



## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

<b>(51) Classification internationale des brevets <sup>5</sup> :</b> <b>G02B 21/00, G01B 11/24, 9/04</b>	<b>A1</b>	<b>(11) Numéro de publication internationale:</b> <b>WO 95/00871</b> <b>(43) Date de publication internationale:</b> 5 janvier 1995 (05.01.95)
<b>(21) Numéro de la demande internationale:</b> PCT/FR94/00747 <b>(22) Date de dépôt international:</b> 21 juin 1994 (21.06.94) <b>(30) Données relatives à la priorité:</b> 93/07534 22 juin 1993 (22.06.93) <b>FR</b> <b>(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US):</b> COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31-33, rue de la Fédération, F-75015 Paris (FR). <b>(72) Inventeur; et</b> <b>(75) Inventeur/Déposant (US seulement):</b> PICARD, Bernard [FR/FR]; La Providence, 3, Les Eymards, F-38700 Corenc (FR). <b>(74) Mandataire:</b> BREVATOME; 25, rue de Ponthieu, F-75008 Paris (FR).		<b>(81) Etats désignés:</b> US, brevet européen (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Publiée Avec rapport de recherche internationale.

PTO 2003-2197

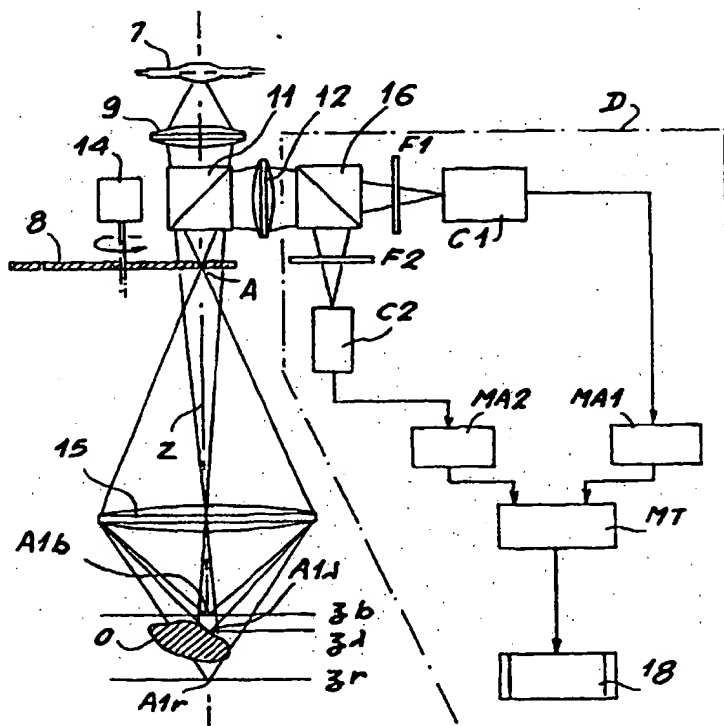
S.T.I.C. Translations Branch

**(54) Title: THREE-DIMENSIONAL IMAGING DEVICE****(54) Titre: DISPOSITIF D'ACQUISITION D'IMAGES TRIDIMENSIONNELLES****(57) Abstract**

A three-dimensional imaging device including a broad-spectrum light source (7), an assembly (8, 14) for forming point sources therefrom, a member (15) for focusing the light from each point source on an object, said focusing member having axial chromatism, a beam splitter (11), chromatic filtering units (F1, F2), light sensors (C1, C2) and an electronic processing unit (MT) for determining the position of each point on the object (0) in parallel to the axis (Z) of the focusing member. Said device is useful for three-dimensional control.

**(57) Abrégé**

Ce dispositif comprend une source de lumière (7) à spectre lumineux étendu, des moyens (8, 14) de formation de sources ponctuelles à partir de cette source, des moyens (15) de focalisation de la lumière de chaque source ponctuelle sur l'objet, ces moyens de focalisation ayant un chromatisme axial, des moyens (11) de séparation de faisceau, des moyens (F1, F2) de filtrage chromatique, des moyens (C1, C2) de photodétection et des moyens électroniques de traitement (MT) pour déterminer la position de chaque point de l'objet (0) parallèlement à l'axe (Z) des moyens de focalisation. Application au contrôle tridimensionnel.



# **UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION**

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Autriche	GB	Royaume-Uni	MR	Mauritanie
AU	Australie	GE	Géorgie	MW	Malawi
BB	Barbade	GN	Guinée	NE	Niger
BE	Belgique	GR	Grèce	NL	Pays-Bas
BF	Burkina Faso	HU	Hongrie	NO	Norvège
BG	Bulgarie	IE	Irlande	NZ	Nouvelle-Zélande
BJ	Bénin	IT	Italie	PL	Pologne
BR	Brézil	JP	Japon	PT	Portugal
BY	Bélarus	KE	Kenya	RO	Roumanie
CA	Canada	KG	Kirghizistan	RU	Fédération de Russie
CF	République centrafricaine	KP	République populaire démocratique de Corée	SD	Soudan
CG	Congo	KR	République de Corée	SE	Suède
CH	Suisse	KZ	Kazakhstan	SI	Slovénie
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	SK	Slovaquie
CM	Cameroun	LK	Sri Lanka	SN	Sénégal
CN	Chine	LU	Luxembourg	TD	Tchad
CS	Tchécoslovaquie	LV	Lettonie	TG	Togo
CZ	République tchèque	MC	Monaco	TJ	Tadjikistan
DE	Allemagne	MD	République de Moldovie	TT	Trinité-et-Tobago
DK	Danemark	MG	Madagascar	UA	Ukraine
ES	Espagne	ML	Mali	US	Etats-Unis d'Amérique
FI	Finlande	MN	Mongolie	UZ	Ouzbékistan
FR	France			VN	Viet Nam
GA	Gabon				

## DISPOSITIF D'ACQUISITION D'IMAGES TRIDIMENSIONNELLES

## DESCRIPTION

La présente invention concerne un  
5 dispositif d'acquisition d'images tridimensionnelles.

Dans des modes de réalisation préférés, la  
présente invention permet une acquisition d'images à  
une cadence de l'ordre de 10 images par seconde ou plus  
et, en particulier, une acquisition d'images "en temps  
10 réel", c'est-à-dire à la cadence vidéo (25 images par  
seconde).

Le domaine de l'imagerie tridimensionnelle  
(c'est-à-dire de l'acquisition d'images  
tridimensionnelles) est en très forte croissance et  
15 touche des secteurs de plus en plus vastes, tant dans  
l'industrie que dans le secteur biomédical.

Les principaux domaines concernés par  
l'imagerie tridimensionnelle sont :

- le contrôle dimensionnel,
- 20 - le contrôle de qualité,
- le guidage de robots,
- l'imagerie biomédicale.

Les techniques utilisées en imagerie  
tridimensionnelle sont très nombreuses.

25 A ce sujet, on se reportera au document (1)  
qui, comme les autres documents cités par la suite, est  
mentionné à la fin de la présente description.

Parmi ces techniques on peut citer  
notamment :

- 30 - la triangulation par laser (utilisant une tache ou  
une ligne lumineuse engendrée par laser),
- l'imagerie confocale,
- la microscopie par effet tunnel,
- l'interférométrie,
- 35 - les franges de moiré,

- la technique de déphasage ("phase shifting"),
- la photogrammétrie,
- la mesure par radar,
- la mesure de temps de vol,
- 5 - la voludensitométrie,
- la profilométrie mécanique.

L'une des principales limitations des systèmes d'acquisition d'images tridimensionnelles est que ces systèmes travaillent souvent à des cadences d'acquisition très inférieures à la cadence vidéo (25 images par seconde).

Les quelques systèmes travaillant à la cadence vidéo sont souvent des réalisations complexes et coûteuses (voir les documents (2) et (3)).

15 Comme on le verra plus loin, dans un mode de réalisation préféré, le dispositif d'imagerie tridimensionnelle objet de la présente invention est apte à travailler à la cadence vidéo tout en étant beaucoup plus simple que les dispositifs connus, aptes à travailler à une telle cadence.

20 La présente invention utilise la technique de l'imagerie confocale.

Cette technique a fait l'objet de nombreux articles notamment dans le domaine de la microscopie (voir le document (4)) où elle est presque exclusivement utilisée.

Le schéma de la figure 1 illustre le principe de l'imagerie confocale.

30 Selon ce principe, un objet à observer est éclairé au moyen d'une source ponctuelle et la lumière réfléchie par cet objet est détectée au moyen d'un détecteur ponctuel.

Plus précisément, la lumière émise par une source S est focalisée au moyen d'une lentille 1, sur

un diaphragme 2, afin d'obtenir une source ponctuelle  $A_0$ .

La source S peut être une source classique à arc ou à filament, ou un laser.

5 Un objectif de focalisation 3 permet de focaliser la lumière transmise par le diaphragme ou filtre 2 selon une tache située au point  $A_{10}$ .

Une lame semi-transparente 4 permet de réfléchir la lumière collectée par l'objectif 3 sur un  
10 photodétecteur 5.

Un diaphragme 6, placé au point  $A_{20}$ , conjugué du point  $A_{10}$  par l'objectif 3, permet de filtrer la lumière réfléchie par la lame semi-transparente 4, le photodétecteur 5 recevant seulement  
15 l'énergie lumineuse transmise par l'ouverture du diaphragme 6.

Une image bidimensionnelle est obtenue par balayage de la tache lumineuse sur l'objet à observer.

Un dispositif d'imagerie confocale est donc  
20 une réalisation particulière des dispositifs d'imagerie optiques à balayage.

Lorsque le point de l'objet à observer est situé dans le plan de focalisation P de l'objectif 3, c'est-à-dire en  $A_{10}$ , l'image de celui-ci par cet  
25 objectif 3 est le point  $A_{20}$  situé au centre de l'ouverture du diaphragme 6.

Dans cette configuration, la largeur de la tache lumineuse au niveau du diaphragme ou filtre 6 est minimale et la quantité de lumière reçue par le  
30 photodétecteur 5 est maximale.

Lorsque le point de l'objet à observer s'éloigne du plan de focalisation de l'objectif 3 et se trouve par exemple en  $A_1$ , l'image de celui-ci par l'objectif 3 est alors le point  $A_2$  et la largeur de la  
35 tache lumineuse au niveau du filtre 6 augmente tandis

que la quantité de lumière reçue par le photodétecteur 5 diminue.

Cette propriété qu'ont les systèmes d'imagerie confocale de donner des images dont 5 l'intensité lumineuse est une fonction décroissante de la distance de l'objet au plan de mise au point de l'objectif de focalisation est désignée sous le terme de "sélectivité axiale".

Dans le cas de faibles défauts de mise au 10 point, la transmission axiale  $T(z)$  du filtre confocal, qui est le rapport de l'intensité lumineuse transmise par le filtre 6 à l'intensité lumineuse incidente sur ce filtre, est donnée par la formule (1) suivante :

15 
$$T(z) = \sin^2(u/2)/(u/2)^2$$

avec :

$$u = (2\pi/\lambda).z.\sin^2\alpha$$

20 où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de la lumière d'observation

$z$  est la distance de l'objet au plan de focalisation, comptée parallèlement à l'axe  $Z$  de l'objectif 3

25  $\sin \alpha$  est l'ouverture numérique de l'objectif de focalisation.

- En imagerie confocale, l'image bidimensionnelle de l'objet à observer est obtenu par balayage de la tache lumineuse.

30 Ce balayage est obtenu par déplacement de l'objet ou de la tache lumineuse ou par déplacement de l'objet dans une direction et déplacement de la tache lumineuse dans une direction perpendiculaire à la précédente.

La grande majorité des systèmes d'imagerie confocale et des systèmes optiques à balayage utilise la lumière d'un faisceau laser en raison du pouvoir de focalisation extrêmement élevé de celui-ci, pouvoir qui  
5 permet d'obtenir des intensités lumineuses élevées dans des taches de dimensions très faibles.

Ces systèmes fonctionnent à des cadences d'acquisition inférieures à la cadence vidéo, en raison du dispositif de balayage qui est en général mécanique  
10 et qui travaille à des fréquences peu élevées.

Cependant, certains systèmes fonctionnent à la cadence vidéo, grâce à l'utilisation d'un miroir polygonal tournant à très grande vitesse (voir le document (2)).

15 Ces systèmes sont toutefois complexes et coûteux.

D'autres systèmes fonctionnant à la cadence vidéo utilisent un dispositif de déflexion acousto-optique du faisceau laser (voir le document (5)).

20 Une technique de balayage par disque de Nipkow permet également de travailler à la cadence vidéo (voir les documents (4), (6) et (7)).

Cette technique de balayage présente l'avantage de pouvoir être utilisée avec des sources  
25 lumineuses classiques du type lampes à arc et d'être facile à mettre en oeuvre.

Un dispositif d'imagerie confocale utilisant un disque de Nipkow est schématiquement représenté sur la figure 2.

30 Un disque de Nipkow est un disque métallique, par exemple un masque de chrome, qui est percé de dizaines de milliers de trous de quelques micromètres de diamètre et disposés en spirales (voir le document (7)).

Le dispositif schématiquement représenté sur la figure 2 comprend une lampe à arc 7 qui éclaire un disque de Nipkow 8 par l'intermédiaire d'une lentille de focalisation 9.

5 Un objectif de focalisation 10, dont l'axe porte la référence Z, projette l'image de ce disque 8 sur un objet à observer O.

La lumière réfléchie par cet objet O traverse en retour le disque 8.

10 Un cube séparateur 11 permet de réfléchir la lumière transmise par le disque vers une lentille de focalisation 12 et cette lentille forme l'image du disque sur la surface photosensible d'une caméra vidéo 13 de type CCD.

15 Lorsque le disque 8 est animé d'un mouvement de rotation grâce à des moyens appropriés 14, ce disque se comporte comme un ensemble de sources lumineuses ponctuelles et de filtres confocaux, selon le schéma de principe de la figure 1, qui balayent en  
20 synchronisme l'objet à observer O.

La rotation du disque permet d'engendrer une image bidimensionnelle au niveau de la caméra 13.

La disposition en spirale des trous du disque 8 provoque un déplacement radial apparent de ces  
25 trous, ce qui évite la formation de lignes sur l'image obtenue.

En imagerie confocale, l'intensité de l'image est maximale lorsque les points de l'objet à observer sont situés dans le plan de mise au point P de  
30 l'objectif de focalisation 10.

Cette propriété peut être utilisée pour obtenir des images tridimensionnelles (voir le document (4)).

Pour ce faire, à l'aide d'un dispositif  
35 d'imagerie confocale, on effectue une série



d'acquisitions de N images (coupes optiques)  $I_n(x,y)$ , à des altitudes différentes  $z_n$  (on déplace pour ce faire l'objet verticalement), où  $z_n$  est égal à l'altitude  $z_0$  du plan de mise au point P augmentée d'une quantité  $n.Dz$  (n variant entre 1 et N).

La recherche du maximum de la série des intensités lumineuses en chaque point de coordonnées (x,y) dans un plan perpendiculaire à l'axe Z permet de déterminer la position du point considéré suivant l'axe Z.

Cette position axiale correspond, en chaque point, à la position z où l'intensité lumineuse obtenue est maximale.

En d'autres termes, pour chaque point (x,y), on dispose de N images suivant l'axe Z et la position z correspondant à l'intersection de l'objet et d'un axe parallèle à l'axe Z correspond à l'intensité lumineuse maximale.

Si l'on utilise un dispositif d'imagerie confocale travaillant à la cadence vidéo pour effectuer les acquisitions, la cadence d'acquisition des images tridimensionnelles est divisée par le nombre N qui représente le nombre d'images nécessaires pour couvrir la topographie de l'objet à observer.

La présente invention permet d'obtenir l'image tridimensionnelle de l'objet en une seule acquisition.

Si l'on considère que le nombre d'acquisitions N peut atteindre couramment la centaine, voire le millier dans certaines applications, on mesure l'intérêt que peut représenter la présente invention.

On connaît par le document (8), auquel on se reportera, un dispositif de microscopie optique confocale à balayage et en profondeur de champ étendue.

Ce dispositif connu utilise :

- une source lumineuse polychromatique, c'est-à-dire ayant au moins deux longueurs d'ondes différentes,
- un système d'imagerie confocale,
- un objectif présentant du chromatisme longitudinal
- 5 ou chromatisme axial, et
- une analyse spectrale de la lumière.

Ces quatre éléments permettent d'obtenir une image tridimensionnelle de l'objet observé, en une seule acquisition.

10 La dynamique longitudinale du dispositif connu est égale au nombre de faisceaux lumineux secondaires.

Ce dispositif connu ne permet de mesurer longitudinalement, parallèlement à l'axe de l'objectif, qu'un nombre limité de points, correspondant au nombre

15 des faisceaux lumineux secondaires.

Afin que la réalisation de ce dispositif connu ne soit pas trop complexe, on utilise en tant que source lumineuse polychromatique un laser à argon dont

20 la lumière contient au plus sept longueurs d'onde suffisamment intenses dans le spectre visible.

Un tel dispositif ne permet donc d'acquérir des images que dans sept plans.

Ce dispositif est suffisant pour être

25 utilisé en microscopie, pour l'observation d'objets microélectroniques tels que des circuits intégrés, mais est inutilisable pour des applications nécessitant une dynamique longitudinale importante.

La présente invention a pour but de

30 remédier à cet inconvénient en proposant un dispositif ayant une grande dynamique longitudinale.

De façon précise, la présente invention a pour objet un dispositif d'acquisition d'images tridimensionnelles d'un objet, ce dispositif

35 comprenant :

- une source de lumière à spectre lumineux étendu,
- des moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles à partir de la lumière issue de la source à spectre lumineux étendu,
- 5 - des moyens de focalisation de la lumière de chaque source ponctuelle sur l'objet, ces moyens de focalisation ayant un chromatisme axial, celui-ci variant de façon monotone (de préférence, de façon linéaire) en fonction de la longueur d'onde de la
- 10 lumière issue de la source,
- des moyens de séparation de faisceau, prévus pour réfléchir la lumière réfléchie par chaque point de l'objet,
- des moyens de filtrage comportant au moins deux
- 15 filtres chromatiques dont les réponses spectrales respectives sont différentes l'une de l'autre et varient de façon monotone (de préférence, de façon linéaire) en fonction de la longueur d'onde de la lumière issue de la source, et qui sont prévus pour
- 20 recevoir la lumière réfléchie par les moyens de séparation de faisceau,
- des moyens de photodétection comportant au moins deux photodétecteurs respectivement associés aux filtres et prévus pour recevoir les lumières
- 25 respectivement filtrées par ceux-ci, ces deux photodétecteurs recevant simultanément des informations lumineuses relatives au même point de l'objet, et
- des moyens électroniques de traitement des signaux
- 30 fournis par les photodétecteurs,
- ce dispositif étant caractérisé en ce que ces moyens électroniques de traitement sont prévus pour former le rapport de l'un de ces signaux à l'autre et pour déterminer la position de chaque point de l'objet
- 35 parallèlement à l'axe des moyens de focalisation, à

l'aide de ce rapport et d'informations qui sont mémorisées dans ces moyens électroniques de traitement et qui résultent d'un étalonnage préalable du dispositif.

5           Le dispositif objet de la présente invention présente une bien plus grande dynamique longitudinale, une plus grande simplicité et donc un coût moindre que le dispositif connu qui est divulgué par le document (8) et qui nécessite autant de  
10   dispositifs de détection ou de modulation qu'il y a de faisceaux lumineux secondaires (alors que deux photodétecteurs suffisent dans la présente invention).

          Selon un mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention, les moyens de  
15   photodétection comprennent deux caméras vidéo de type CCD ou à tube, agencées de façon que les pixels photosensibles de l'une de ces caméras soient respectivement associés aux pixels photosensibles de l'autre caméra et que chaque point de l'objet soit  
20   observé par deux pixels associés.

          Selon un autre mode de réalisation particulier, le dispositif objet de l'invention comprend une caméra vidéo en couleur qui constitue à la fois les moyens de filtrage et les moyens de  
25   photodétection.

          Dans une première réalisation particulière de l'invention, les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles comprennent :

- un disque de Nipkow, et
- 30   - des moyens de rotation de ce disque autour de son axe.

          Dans le cas où l'on utilise les deux caméras vidéo mentionnées plus haut, les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles peuvent  
35   comprendre un masque fixe comportant des ouvertures,

chacune de ces ouvertures correspondant à un pixel photosensible de chacune des deux caméras.

Dans le cas où l'on utilise la caméra vidéo en couleur mentionnée plus haut, les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles peuvent comprendre un masque fixe comportant des ouvertures, chacune de ces ouvertures correspondant à un pixel photosensible de la caméra vidéo en couleur.

Dans une autre réalisation particulière de l'invention, les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles comprennent :

- un masque à une ouverture, formant un filtre confocal, et
- des moyens de déplacement relatif de l'objet par rapport au faisceau lumineux issu de la source de lumière à spectre lumineux étendu.

Le dispositif objet de l'invention peut comprendre en outre un faisceau de fibres optiques ordonnées, qui est placé entre les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles et les moyens de focalisation.

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1, déjà décrite, illustre schématiquement le principe de l'imagerie confocale,
- la figure 2, déjà décrite, est une vue schématique d'un dispositif connu d'imagerie confocale utilisant un disque de Nipkow,
- la figure 3 est une vue schématique d'un mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention,

- la figure 4 est une vue schématique d'un objectif de focalisation qui présente un chromatisme axial et qui est utilisé dans le dispositif de la figure 3,
- la figure 5 est une vue schématique et partielle d'un autre dispositif conforme à l'invention utilisant une caméra vidéo en couleur,
- la figure 6 est une vue schématique et partielle d'un autre dispositif conforme à l'invention utilisant une ouverture jouant le rôle de filtre confocal, deux détecteurs ponctuels et des moyens de balayage de l'objet à étudier,
- la figure 7 est une vue schématique d'un masque utilisable dans la présente invention, et
- la figure 8 est une vue schématique et partielle d'un autre dispositif conforme à l'invention utilisant un faisceau de fibres optiques ordonnées.

Le dispositif conforme à l'invention, qui est schématiquement représenté sur la figure 3, permet une acquisition d'images à la cadence vidéo et comprend, comme le dispositif représenté sur la figure 2 :

- la source lumineuse à spectre large 7, par exemple une lampe à arc au Xénon,
- le disque de Nipkow 8 muni des moyens de rotation 14,
- la lentille 9 de focalisation de la lumière émise par la source 7 sur le disque 8,
- le cube séparateur 11, et
- la lentille de focalisation 12.

Le dispositif de la figure 3 comprend aussi un objectif de focalisation 15 présentant un chromatisme axial, au lieu de l'objectif de focalisation 10, l'axe de l'objectif 15 portant la référence Z, l'axe de rotation du disque 8 étant parallèle à cet axe Z dans l'exemple de la figure 3.

La largeur du spectre de la source 7 est adaptée à la dynamique longitudinale souhaitée (plus on souhaite une dynamique importante, plus il faut choisir un spectre large).

5 Comme précédemment, le cube séparateur 11 est compris entre la lentille 9 et le disque 8 et ce cube séparateur 11 est traversé par la lumière issue de la source 7 et focalisée par la lentille 9 et réfléchit la lumière en provenance de l'objectif à chromatisme axial 15 en direction de la lentille 12 qui focalise cette lumière réfléchie.

L'effet du chromatisme axial, ou chromatisme longitudinal, de l'objectif de focalisation 15 est schématiquement illustré par la figure 4.

15 La distance focale de cet objectif 15 dépend de la longueur d'onde de la lumière.

Un tel objectif présente autant de plans de focalisation différents qu'il y a de longueurs d'ondes présentes dans le faisceau lumineux incident.

20 Ainsi, une source lumineuse placée en un point A a autant d'images données par cet objectif qu'il y a de longueurs d'ondes présentes dans le faisceau lumineux.

25 Ces images sont alignées selon un segment lumineux Alb, Alr où Alb et Alr sont respectivement les images bleue et rouge du point A.

- On a également représenté une image intermédiaire Al $\lambda$  comprise entre Alb et Alr où  $\lambda$  est une longueur d'onde comprise entre la longueur d'onde correspondant au bleu et la longueur d'onde correspondant au rouge.

On voit aussi sur la figure 4 un autre point B dont les images Blb, Bl $\lambda$  et Blr correspondent respectivement aux images Alb, Al $\lambda$  et Alr du point A.

L'effet du chromatisme longitudinal d'un objectif, en imagerie confocale, est décrit dans les documents (5) et (7).

On a vu précédemment que, en imagerie  
5 confocale, la transmission du filtre confocal est une fonction décroissante de la distance, comptée suivant l'axe Z de l'objectif, des points de l'objet au plan de focalisation de l'objectif conformément à la formule (1).

10 Ainsi, si l'objectif de focalisation présente un chromatisme longitudinal, en un point donné de l'objet, le disque de Nipkow transmet différemment chaque longueur d'onde selon la distance, comptée suivant l'axe Z de l'objectif, séparant ce point du  
15 plan de focalisation correspondant.

La longueur d'onde dont le plan de focalisation correspondant coïncide avec le point de l'objet est transmise avec le maximum d'intensité lumineuse et les autres longueurs d'ondes sont  
20 transmises avec des intensités décroissantes au fur et à mesure que la distance qui sépare de l'objet les plans de focalisation correspondants augmente.

Dans le dispositif schématiquement représenté sur la figure 3, si les spectres de la  
25 source lumineuse 7 et de l'objet sont parfaitement blancs, on obtient de l'objet 0 (qui est placé dans la zone de focalisation de l'objectif 15) une image colorée qui est parfaitement focalisée et dont la composition spectrale en chaque point ne dépend que de  
30 la position axiale de ce point par rapport à l'objectif de focalisation 15.

Ainsi, le dispositif de la figure 3 comprend un "module de codage" comportant un dispositif confocal muni d'un objectif ayant un chromatisme



longitudinal, pour effectuer un codage chromatique de la position axiale des points de l'objet O.

Réciproquement, une analyse chromatique point par point de l'image colorée permet de déterminer la position axiale des points de l'objet O.

Cette analyse chromatique est réalisée dans un "module de décodage" que comprend également le dispositif de la figure 3.

Ce module de décodage D comprend un autre cube séparateur 16 (permettant d'obtenir deux images identiques à partir de l'image formée par la lentille 12), une première caméra vidéo de type CCD ou à tube, référencée C1 et associée à un premier filtre chromatique F1, ainsi qu'une deuxième caméra vidéo de type CCD ou à tube, référencée C2 et associée à un deuxième filtre chromatique F2.

L'image colorée, qui est réfléchiée par le cube séparateur 11, est ensuite envoyée par le cube séparateur 16 sur les pixels photosensibles des caméras C1 et C2 par l'intermédiaire des filtres F1 et F2.

On précise que les caméras C1 et C2 sont agencées de façon que les pixels photosensibles de ces deux caméras voient les mêmes points de l'objet O, c'est-à-dire que chaque pixel de l'une des caméras soit associé à un pixel de l'autre caméra, deux pixels associés voyant un même point de l'objet O.

- Le module de décodage D comprend aussi :

- deux cartes électroniques d'acquisition et de numérisation des images vidéo respectivement fournies par les caméras C1 et C2 et portant respectivement les références MA1 et MA2,
- un module électronique de traitement MT destiné à effectuer la division de l'une des images numérisée par l'autre, pixel par pixel, ainsi que le calcul de la position suivant l'axe Z, des points de l'objet

O, et à commander le fonctionnement de l'ensemble du dispositif de la figure 3, et

- des moyens 18 de visualisation, un écran vidéo par exemple, destinés à visualiser les résultats des calculs.

On précise qu'un dispositif d'analyse de la couleur au moyen de deux photodiodes ayant des sensibilités spectrales différentes est décrit dans le document (9).

On décrit maintenant la modélisation mathématique du fonctionnement du dispositif de la figure 3.

Dans ce qui suit :

- $L(\lambda)$  désigne la composition spectrale de la source lumineuse 7

- $r(x, y, \theta, \phi)$  désigne le facteur de réflexion de l'objet O au point de coordonnées  $(x, y)$ , dans la direction de l'axe Z de l'objectif de focalisation 15, qui est orientée selon les angles  $\theta$  et  $\phi$  par rapport à la normale à l'objet en ce point (les coordonnées  $x$  et  $y$  étant définies dans un plan perpendiculaire à l'axe Z)

- $R(\lambda)$  désigne la réflectivité spectrale de l'objet, que l'on suppose uniforme sur tout l'objet

- $T(z)$  désigne la transmission axiale du filtre confocal en fonction de  $z$  (voir formule (1))

- $z$  désigne la position axiale des points de l'objet (comptée sur l'axe Z)

- $z(\lambda)$  désigne la "courbe" de chromatisme de l'objectif de focalisation, c'est-à-dire, la position (repérée sur l'axe Z) du plan de focalisation pour une longueur d'onde  $\lambda$  donnée (pour la position du disque de Nipkow pour laquelle l'objectif 15 est calculé de façon à avoir une bonne résolution et le chromatisme voulu)

-  $T_1(\lambda)$  désigne la transmission spectrale du filtre F1

-  $T_2(\lambda)$  désigne la transmission spectrale du filtre F2

5 -  $S_1(\lambda)$  désigne la sensibilité spectrale de la caméra C1

-  $S_2(\lambda)$  désigne la sensibilité spectrale de la caméra C2.

10 Pour la longueur d'onde  $\lambda$ , la transmission axiale du disque de Nipkow 8 est égale à  $T(z - z(\lambda))$ .

La composition spectrale de l'image du point de l'objet, de coordonnées  $(x, y, z)$ , qui est reçue par la caméra C1, est donnée par la relation (2) :

15 
$$\Phi_1(x, y, z, \lambda) = L(\lambda) \cdot r(x, y, \theta, \phi) \cdot R(\lambda) \cdot T(z - z(\lambda)) \cdot T_1(\lambda).$$

Le signal délivré par la caméra C1 est donné par la relation (3) :

20 
$$s_1(x, y, z) = \int \Phi_1(x, y, z, \lambda) \cdot S_1(\lambda) \cdot d\lambda$$

On a donc la relation (4) :

$$s_1(x, y, z) = \int r(x, y, \theta, \phi) \cdot L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z - z(\lambda)) \cdot T_1(\lambda) \cdot S_1(\lambda) \cdot d\lambda$$

25

On précise que toutes ces intégrales et les suivantes sont prises sur le spectre de la source lumineuse.

30 Si l'objectif de focalisation 15 ne présente pas de chromatisme latéral, les coordonnées  $x$  et  $y$  des points de l'objet visés par chaque caméra sont indépendantes de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Dans ce cas, le terme  $r(x,y,\theta,\varphi)$  peut être sorti de l'intégrale et la relation (4) peut alors se réécrire selon la relation (5) :

$$s_1(x,y,z) = r(x,y,\theta,\varphi) \cdot F_1(z)$$

où  $F_1(z)$  désigne l'intégrale

$$\int L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z - z(\lambda)) \cdot T_1(\lambda) \cdot S_1(\lambda) \cdot d\lambda$$

10

Cette intégrale ne dépend que de la position axiale  $z$  du point de coordonnées  $(x,y)$  de l'objet.

De même, le signal délivré par la caméra C2  
15 est donné par la relation (6) :

$$s_2(x,y,z) = r(x,y,\theta,\varphi) \cdot F_2(z)$$

où  $F_2(z)$  désigne l'intégrale

20

$$\int L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z - z(\lambda)) \cdot T_2(\lambda) \cdot S_2(\lambda) \cdot d\lambda$$

En calculant le rapport  $s_1(x,y,z)/s_2(x,y,z)$  on élimine le terme  $r(x,y,\theta,\varphi)$ .

25 On obtient alors la quantité  $s(z)$  qui ne dépend plus que de  $z$ , selon la relation (7) :

$$s(z) = F_1(z) / F_2(z)$$

30 Au cours d'une opération d'étalonnage du dispositif, on détermine expérimentalement les variations du rapport  $p=s(z)$  en fonction de  $z$  et l'on mémorise ces variations dans le module électronique de traitement MT.

Ainsi, le calcul du paramètre  $\rho$  de l'image d'un point de l'objet, de coordonnées  $(x,y)$ , permet de déterminer la position axiale  $z$  de ce point, selon la relation (8) :

5

$$z = s^{-1}(\rho)$$

En pratique, on utilise deux caméras C1 et C2 identiques et les sensibilités  $S1(\lambda)$  et  $S2(\lambda)$  sont donc théoriquement identiques.

10

Si l'on n'utilisait pas les filtres F1 et F2 on aurait :

$$F1(z) = F2(z) = \int L(\lambda).R(\lambda).T(z - z(\lambda)).S1(\lambda).d\lambda$$

15

Le paramètre  $\rho$  serait égal à 1 et ne permettrait pas de mesurer la position axiale des points de l'objet.

L'utilisation des filtres F1 et F2, dont les sensibilités, ou réponses, spectrales sont différentes l'une de l'autre, permet d'obtenir un rapport  $F1(z)/F2(z)$  évoluant notablement en fonction de la position axiale des points de l'objet.

20

On considère maintenant le cas où le chromatisme axial de l'objectif 15 est grand devant la sélectivité axiale du dispositif confocal.

25

Considérons par exemple un dispositif confocal ayant les caractéristiques suivantes :

- sélectivité axiale  $\Delta z = 20 \mu m$
- 30 - largeur spectrale de la source lumineuse  $\Delta \lambda = 0,4 - 0,8 \mu m$
- chromatisme de l'objectif = 1 mm dans la bande 0,4 - 0,8  $\mu m$ .

Dans ce cas, la largeur à mi-hauteur de la fonction  $T(z-z(\lambda))$  est égale à 20/1000 soit 1/50ème de la largeur spectrale  $\Delta\lambda$  de la source lumineuse 7.

Les grandeurs  $L(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$ ,  $T1(\lambda)$  et  $S1(\lambda)$  variant lentement en fonction de  $\lambda$ ,  $T(z-z(\lambda))$  peut être assimilé à un "pic" de Dirac  $\delta(\lambda-\lambda_z)$  où  $\lambda_z$  représente la longueur d'onde correspondant au plan de focalisation dont la position axiale est égale à  $z$ .

Dans ce cas, on peut écrire :

10

$$F1(z) = \int L(\lambda).R(\lambda).\delta(\lambda - \lambda_z).T1(\lambda).S1(\lambda).d\lambda$$

$$F1(z) = L(\lambda_z).R(\lambda_z).T1(\lambda_z).S1(\lambda_z)$$

15

La relation (7) devient alors la relation (9) :

$$s(z) = (T1(\lambda_z).S1(\lambda_z)) / (T2(\lambda_z).S2(\lambda_z)).$$

20

Dans le cas où le chromatisme axial de l'objectif 15 est grand par rapport à la sélectivité axiale du dispositif confocal, il n'est pas nécessaire de supposer que la réflectivité spectrale de l'objet est uniforme.

25

En effet, notons  $r(x,y,\theta,\phi,\lambda)$  la réflectivité spectrale de l'objet au point de coordonnées  $(x,y)$ , dans la direction de l'axe  $Z$  de l'objectif de focalisation, qui est orientée selon les angles  $\theta$  et  $\phi$  par rapport à la normale à l'objet en ce point.

30

Dans la mesure où  $r(x,y,\theta,\phi,\lambda)$  varie lentement en fonction de  $\lambda$ , la relation (4) se transforme en la relation (10) suivante :

35

$$s1(x,y,z) = \int r(x,y,\theta,\phi,\lambda).L(\lambda).\delta(\lambda - \lambda_z).T1(\lambda).S1(\lambda).d\lambda$$

Il en résulte la relation (11) suivante :

$$s1(x, y, z) = r(x, y, \theta, \phi, \lambda z). L(\lambda z). T1(\lambda z). S1(\lambda z)$$

5

Le rapport  $s1(x, y, z)/s2(x, y, z)$  permet d'éliminer les termes  $r(x, y, \theta, \phi, \lambda z)$  et  $L(\lambda z)$  et ce rapport est exprimé à nouveau par la relation (9).

De même, dans ce cas où le chromatisme axial de l'objectif 15 est grand par rapport à la sélectivité axiale du dispositif confocal, il n'est pas nécessaire que l'objectif de focalisation 15 soit corrigé du chromatisme latéral.

En effet, si l'objectif présente du chromatisme latéral, cela signifie que les coordonnées  $x$  et  $y$  des points de l'objet visés par chaque caméra dépendent de la longueur d'onde  $\lambda$ , c'est-à-dire que  $x=x(\lambda)$  et  $y=y(\lambda)$ .

Dans ce cas, le terme  $r(x, y, \theta, \phi)$  s'écrit  $r(x(\lambda), y(\lambda), \theta, \phi)$  et la relation (11) devient la relation (12) suivante :

$$s1(x, y, z) = r(x(\lambda z), y(\lambda z), \theta, \phi, \lambda z). L(\lambda z). T1(\lambda z). S1(\lambda z)$$

25 Le terme  $r(x(\lambda z), y(\lambda z), \theta, \phi, \lambda z)$  est également éliminé en calculant le rapport  $s1(x, y, z)/s2(x, y, z)$ .

~~Il convient que le chromatisme longitudinal~~  
de l'objectif de focalisation 15 soit calculé de telle sorte que ce chromatisme longitudinal varie de façon monotone en fonction de la longueur d'onde de la lumière issue de la source, l'idéal étant une variation linéaire qui donne une variation très simple entre les différentes longueurs d'onde et les plans de focalisation associés.

30

Cet objectif de focalisation 15 peut-être, selon les conditions de travail, éventuellement corrigé du chromatisme latéral.

De plus, l'objectif de focalisation 15 est  
5 calculé de telle sorte qu'il soit corrigé des aberrations géométriques pour l'ensemble des longueurs d'ondes utilisées.

En outre, il convient que les deux filtres chromatiques F1 et F2 soient choisis de telle sorte que  
10 l'amplitude du signal  $s(z)$  de la formule (7) varie de façon monotone avec la position axiale  $z$  des points de l'objet O, cette variation étant de préférence linéaire.

La figure 5 est une vue schématique et  
15 partielle d'un autre mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention.

Dans le module de décodage D représenté sur cette figure 5, les deux caméras C1 et C2 et les deux filtres chromatiques F1 et F2 de la figure 3 sont  
20 remplacés par une caméra vidéo en couleur C3.

Cette caméra C3 est disposée de façon que chaque pixel photosensible de celle-ci sont associés à un point de l'objet O à examiner.

Une telle caméra vidéo en couleur comprend  
25 des filtres chromatique et fournit des signaux vidéo généralement appelé signaux vert, rouge et bleu.

Il suffit alors de sélectionner deux de ces  
signaux, par exemple les signaux rouge et vert, et d'envoyer ceux-ci respectivement aux modules MA1 et MA2  
30 pour les traiter comme précédemment, ce qui permet encore de calculer la position axiale  $z$  en calculant le rapport des images numériques correspondant à ces signaux rouge et vert, pixel par pixel.

Dans un autre dispositif conforme à  
35 l'invention qui est schématiquement et partiellement



représenté sur la figure 6, le disque de Nipkow 8 de la figure 3 est remplacé par un masque fixe 20 à une ouverture, jouant le rôle de filtre confocal.

Les deux caméras C1 et C2 sont de plus  
5 remplacées respectivement par deux photodétecteurs ponctuels P1 et P2 qui sont par exemple des photodiodes ou des photomultiplicateurs.

Ces photodétecteurs P1 et P2 sont respectivement associés aux filtres F1 et F2 et les  
10 signaux fournis par ces photodétecteurs P1 et P2 sont respectivement traités par les modules MA1 et MA2 et par les moyens MT et 18 mentionnés plus haut.

De plus, dans le cas du dispositif de la figure 6, le balayage de l'objet à examiner est réalisé  
15 par déplacement de cet objet ou par déflexion du faisceau lumineux atteignant cet objet, ce balayage étant réalisable grâce à un miroir tournant 22 que l'on peut disposer à la suite du masque 20.

Dans un autre mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention, le  
20 disque de Nipkow 8 de la figure 3 est remplacé par un masque fixe 24 (figure 7), qui est perpendiculaire à l'axe Z de l'objectif de focalisation 15 et qui comporte des ouvertures 26.

25 Ce masque (qui est placé au même endroit que le disque de Nipkow précédemment utilisé) est par exemple une plaque de verre recouverte d'une fine couche de chrome comportant les ouvertures 26.

Ces ouvertures 26 sont réalisées de telle  
30 sorte que chacune d'entre elle corresponde à un pixel photosensible unique de chacune des caméras, selon le schéma de la figure 7.

Afin que le masque 24 puisse jouer l'effet d'un filtre confocal, il convient que la tache de  
35 diffraction de l'objectif 15 soit beaucoup plus petite

que la distance séparant deux pixels adjacents et vaille par exemple un dixième de cette distance.

Ainsi, si la distance séparant deux pixels adjacents de chaque caméra, rapportée à l'objet, est de  
5 20  $\mu\text{m}$ , la résolution de l'objectif de focalisation devra être de 2  $\mu\text{m}$ .

Le dispositif de la figure 7 présente l'avantage de remplacer le disque de Nipkow mobile en rotation par un masque qui est fixe.

10 Cependant les ouvertures doivent être alignées précisément par rapport aux pixels des deux caméras C1 et C2.

Le dispositif conforme à l'invention, qui est schématiquement et partiellement représenté sur la  
15 figure 8, diffère de celui qui est représenté sur la figure 3 par le fait qu'il comprend en outre un faisceau de fibres optiques ordonnées 30, qui peut être éventuellement un endoscope souple, entre l'objectif de focalisation 15 et le disque de Nipkow 8, comme on le  
20 voit sur la figure 8.

En outre, une optique 32, dont l'axe X est parallèle à l'axe du disque de Nipkow 8, est prévue entre ce disque et le faisceau de fibres optiques 30 pour injecter le faisceau lumineux issu des ouvertures  
25 du disque dans ce faisceau de fibres optiques 30.

L'autre extrémité de ce faisceau se trouve sur l'axe Z de l'optique (15 qui n'est plus parallèle à l'axe du disque dans le cas de la figure 8).

Un faisceau de fibres optiques ordonnées à  
30 la propriété de transporter des images optiques de la même façon qu'une lentille, la résolution étant donnée par le diamètre des fibres élémentaires formant ce faisceau.

Afin que le faisceau de fibres optiques  
35 n'altère pas la propriété d'imagerie confocale du

dispositif conforme à l'invention, il est nécessaire que le diamètre des fibres optiques de ce faisceau soit inférieur à la tache de diffraction de l'objectif de focalisation 15.

5 Ce diamètre des fibres optiques du faisceau 30 est calculé en fonction de la résolution de cet objectif.

On calcule le diamètre du faisceau de fibres optiques 30 en fonction de la dimension de l'image donnée par cet objectif, le diamètre de ce faisceau étant choisi supérieur au diamètre de l'image.

Les documents cités dans la présente description sont les suivants :

- 15 (1) Active, Optical Range Imaging Sensors, Paul J. Besl, Machine Vision and Applications (1988) p.127-152
- 20 (2) Registered intensity and range imaging at 10 mega-samples per second, J. Angelo Beraldin - Marc Rioux - François Blais - Luc Cournoyer - Jacques Domey, Optical Engineering / Janvier 1992 / vol.31 n°1
- 25 (3) Laser-scanning imaging system for real-time measurements of 3-D object profiles, K. Kobayashi - K. Akiyama - T. Suzuki - I. Yoshizawa, Optics Communications vol.74, n°3,4 p.165 (15 Dec 1989)
- 30 (4) THEORY AND PRACTICE OF SCANNING OPTICAL MICROSCOPY, Tony Wilson - Colin Sheppard - Academic Press
- 35 (5) A Standard Video-Rate Confocal Laser-Scanning Reflection and Fluorescence Microscope,. A. Draaijer - P.M. Houpt, Scanning Vol.10, 139-145 (1988)

- (6) CONFOCAL OPTICAL MICROSCOPY, A. Boyde - Microscopy and Analysis
- 5 (7) New types of scanning optical microscopes, G.S. Kino - T.R. Corle - G.Q. Xiao, SPIE vol.921 Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control II (1988)
- 10 (8) FR-A-2 626 383 (voir aussi EP-A-0327425 et US-A-4,965,441)
- (9) LES NOUVEAUX CAPTEURS INDUSTRIELS - Tech Tendances - Innovation 128

## REVENDECATIONS

1. Dispositif d'acquisition d'images tridimensionnelles d'un objet, ce dispositif comprenant :

- 5 - une source de lumière (7) à spectre lumineux étendu,
- des moyens (8, 14; 20, 22, 24) de formation de sources lumineuses ponctuelles à partir de la lumière issue de cette source à spectre lumineux étendu,
- 10 - des moyens (15) de focalisation de la lumière de chaque source ponctuelle sur l'objet, ces moyens de focalisation ayant un chromatisme axial, celui-ci variant de façon monotone en fonction de la longueur d'onde de la lumière issue de la source,
- 15 - des moyens (11) de séparation de faisceau, prévus pour réfléchir la lumière réfléchie par chaque point de l'objet,
- des moyens de filtrage comportant au moins deux filtres chromatiques (F1, F2) dont les réponses spectrales respectives sont différentes l'une de
- 20 l'autre et varient de façon monotone en fonction de la longueur d'onde de la lumière issue de la source, et qui sont prévus pour recevoir la lumière réfléchie par les moyens (11) de séparation de
- 25 faisceau,
- des moyens de photodétection comportant au moins deux photodétecteurs (C1, C2; P1, P2) respectivement associés aux filtres (F1, F2) et prévus pour
- 30 recevoir les lumières respectivement filtrées par ceux-ci, ces deux photodétecteurs recevant simultanément des informations lumineuses relatives au même point de l'objet, et
- des moyens électroniques (MT) de traitement des signaux fournis par les photodétecteurs,

ce dispositif étant caractérisé en ce que ces moyens électroniques de traitement sont prévus pour former le rapport de l'un de ces signaux à l'autre et pour déterminer la position de chaque point de l'objet  
5 parallèlement à l'axe des moyens de focalisation, à l'aide de ce rapport et d'informations qui sont mémorisées dans ces moyens électroniques de traitement et qui résultent d'un étalonnage préalable du dispositif.

10 2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le chromatique axial des moyens de focalisation (15) varie de façon linéaire en fonction de la longueur d'onde de la source.

15 3. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que la réponse spectrale de chaque filtre chromatique (F1, F2) varie de façon linéaire en fonction de la longueur d'onde de la source.

20 4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les moyens de photodétection comprennent deux caméras vidéo (C1, C2) de type CCD, ou à tube, agencées de façon que les pixels photosensibles de l'une de ces caméras soient respectivement associés aux pixels photosensibles de  
25 l'autre caméra et que chaque point de l'objet soit observé par deux pixels associés.

- 5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il comprend une caméra vidéo en couleur qui constitue à la fois les  
30 moyens de filtrage et les moyens de photodétection.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles comprennent :

35 - un disque de Nipkow (8), et

- des moyens (14) de rotation de ce disque autour de son axe.

7. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles comprennent un masque fixe (24) comportant des ouvertures (26), chacune de ces ouvertures correspondant à un pixel photosensible (28) de chacune des deux caméras (C1, C2).

8. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce que les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles comprennent un masque fixe (24) comportant des ouvertures (26), chacune de ces ouvertures correspondant à un pixel photosensible de la caméra vidéo en couleur.

9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles comprennent :

- un masque (20) à une ouverture, formant un filtre confocal, et
- des moyens (22) de déplacement relatif de l'objet (0) par rapport au faisceau lumineux issu de la source de lumière (7) à spectre lumineux étendu.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un faisceau (30) de fibres optiques ordonnées, qui est placé entre les moyens de formation de sources lumineuses ponctuelles et les moyens de focalisation (15).

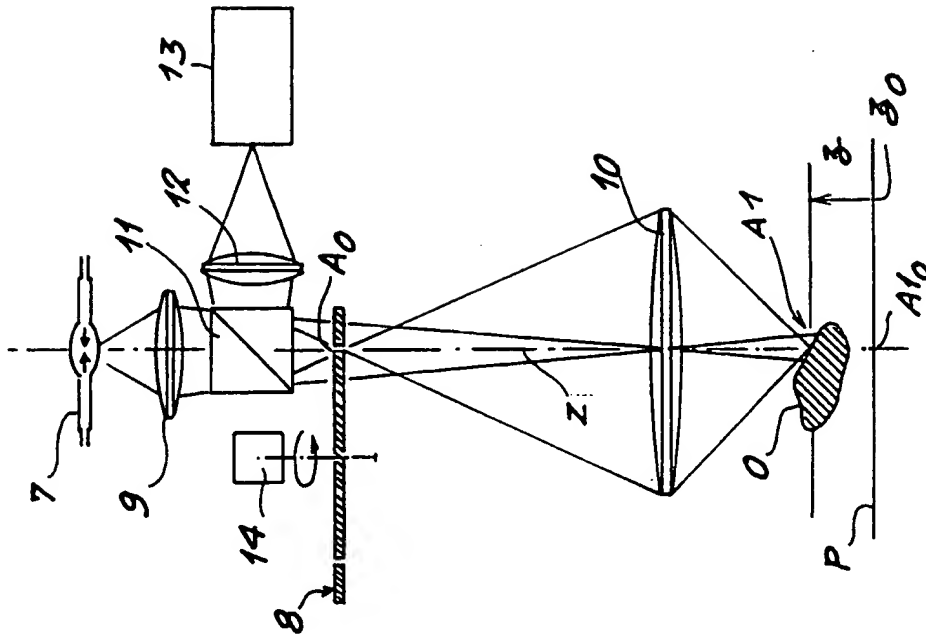


FIG. 2

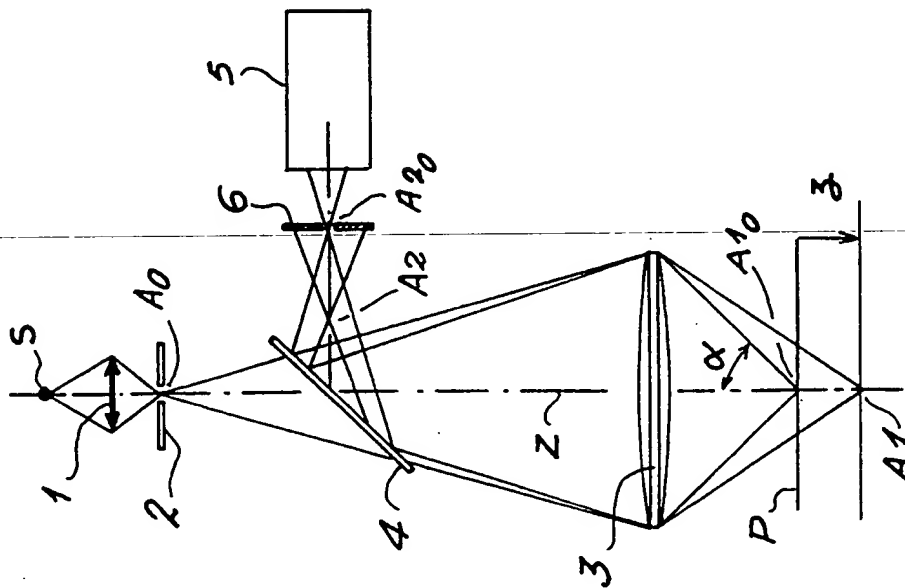


FIG. 1



215

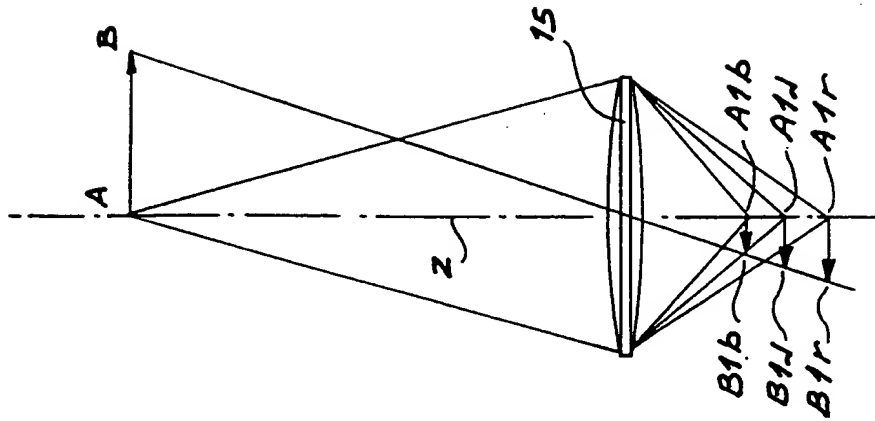


FIG. 4

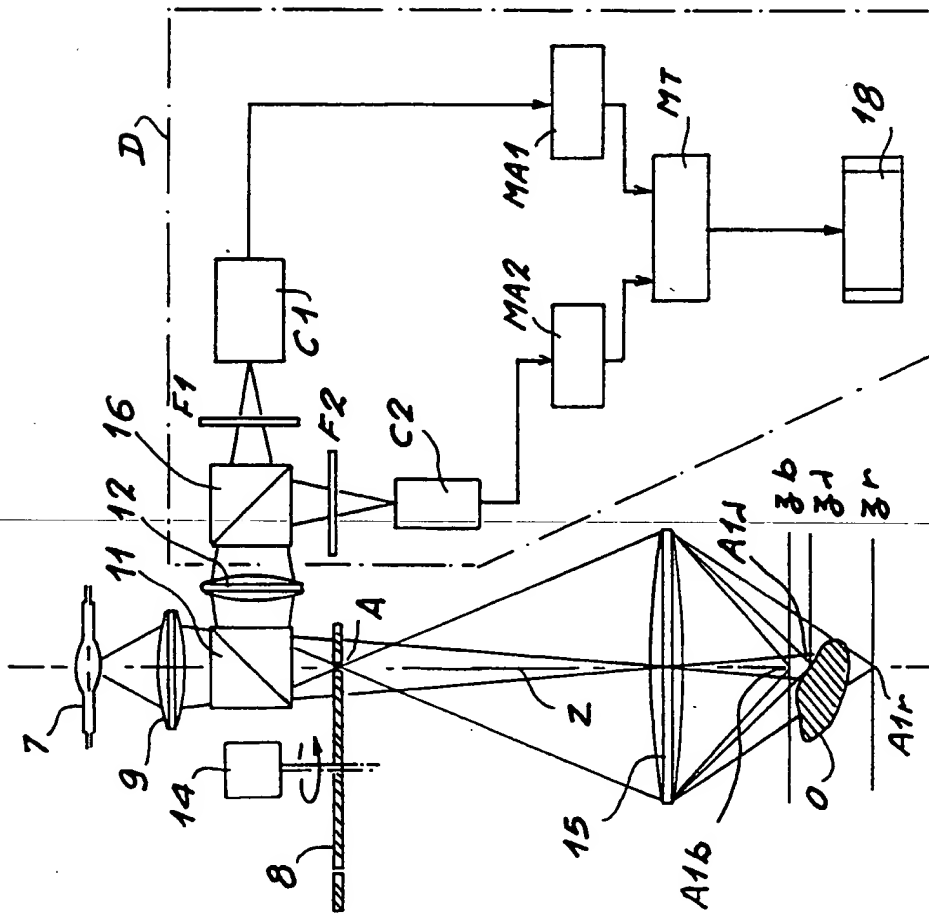


FIG. 3

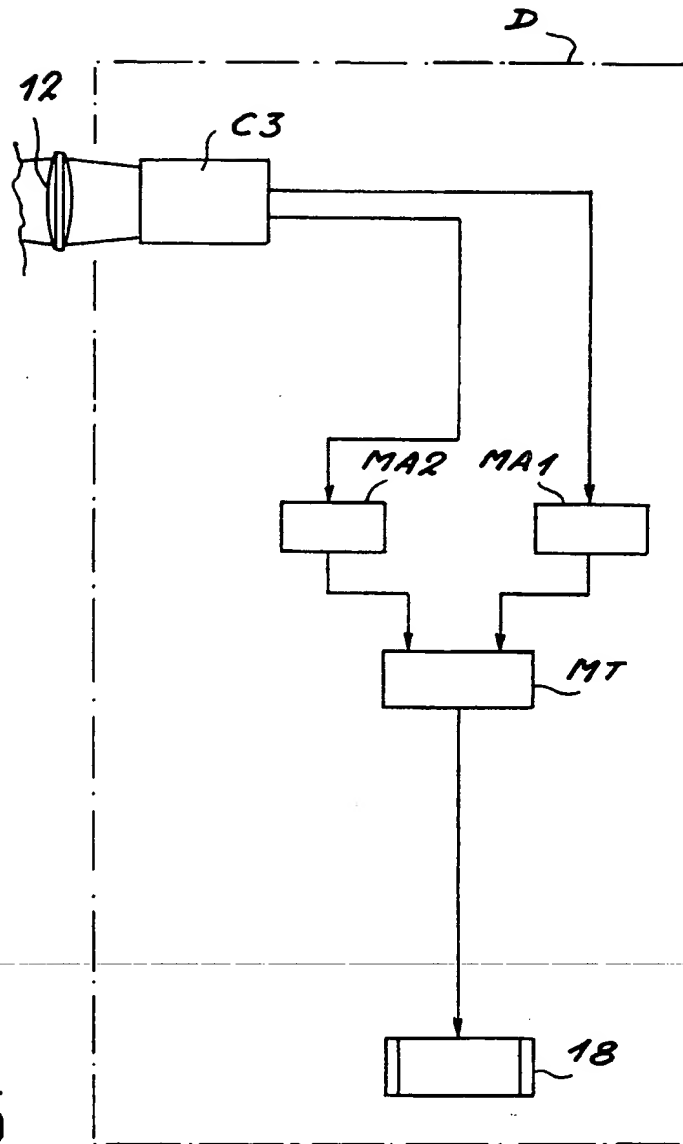


FIG. 5

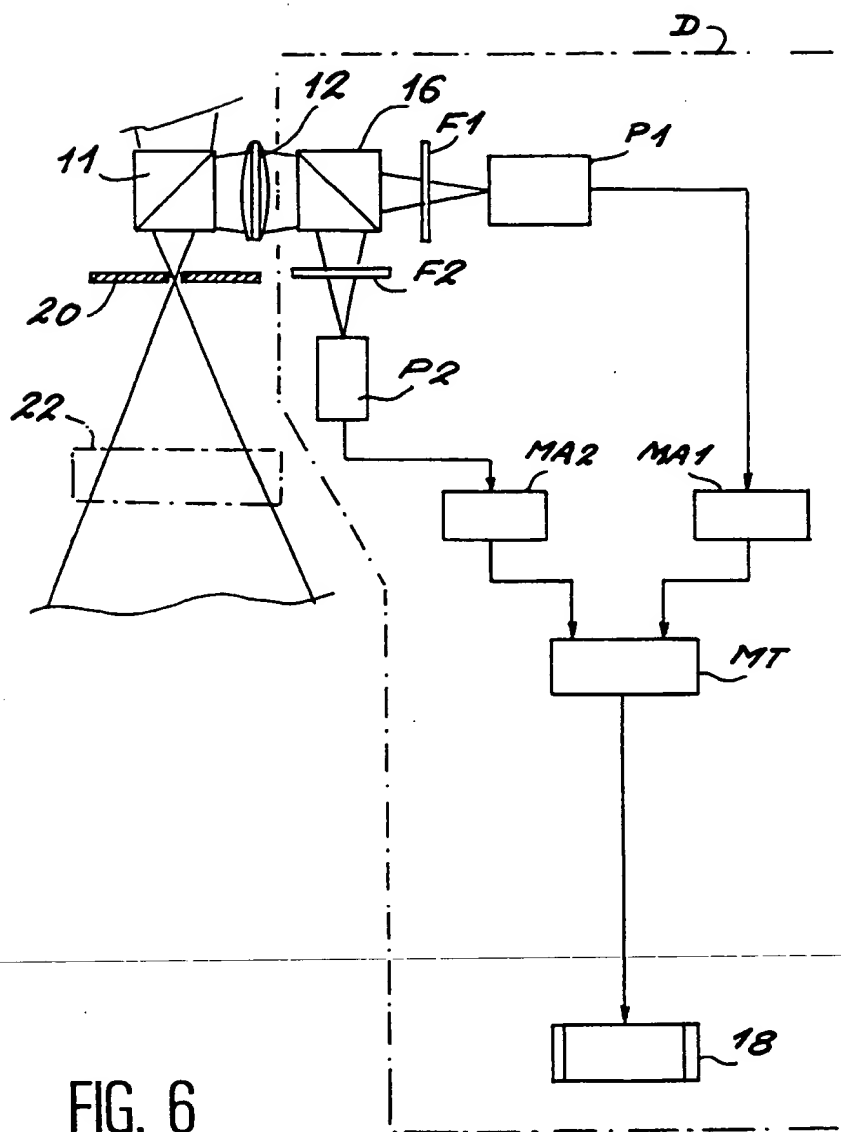


FIG. 8

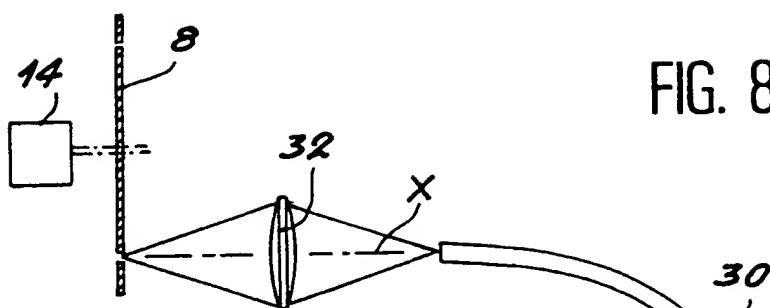
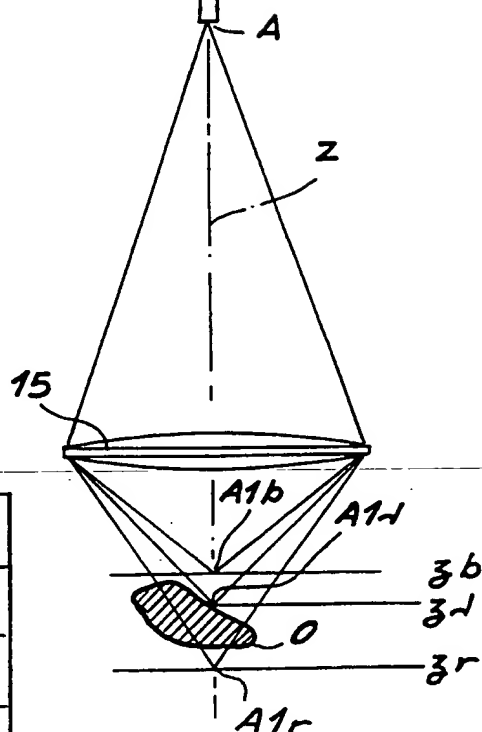
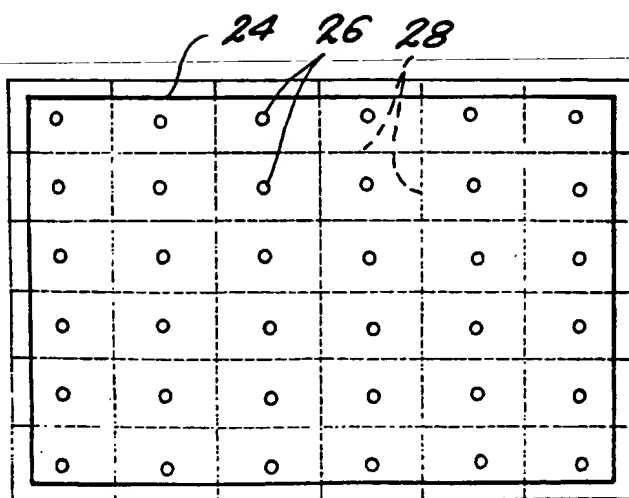


FIG. 7



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Intern. Appl. No.

PCT/FR 94/00747

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 5 G02B21/00 G01B11/24 G01B9/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 5 G02B G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO,A,88 10406 (BATELLE-INSTITUT E.V.) 29 December 1988 see the whole document ---	1-10
Y	WO,A,92 01965 (LASERTECHNIK GMBH) 6 February 1992 see the whole document ---	1-10
Y	EP,A,0 327 425 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE) 9 August 1989 cited in the application see the whole document ---	1-10
A	WO,A,92 17806 (G. BRAKENHOFF) 15 October 1992 see page 8, line 4 - line 28 see page 9, line 11 - line 36; figures 4,5 --- -/--	4

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

4 October 1994

Date of mailing of the international search report

19. 10. 94

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Scheu, M

**PCT/FR 94/00747**

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1992)

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR 94/00747

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO-A-8810406	29-12-88	CH-A- 671828 DE-A- 3869579 EP-A, B 0321529 US-A- 5165063	29-09-89 30-04-92 28-06-89 17-11-92
WO-A-9201965	06-02-92	DE-A- 4023292 EP-A- 0466979 JP-T- 5502953	23-01-92 22-01-92 20-05-93
EP-A-0327425	09-08-89	FR-A- 2626383 DE-T- 68906040 JP-A- 1245215 US-A- 4965441	28-07-89 14-10-93 29-09-89 23-10-90
WO-A-9217806	15-10-92	NONE	
EP-A-0485803	20-05-92	DE-A- 4035799 CA-A- 2054928 JP-A- 4265918 US-A- 5239178	14-05-92 11-05-92 22-09-92 24-08-93

## RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dema internationale No

PCT/FR 94/00747

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE  
CIB 5 G02B21/00 G01B11/24 G01B9/04

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

## B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 5 G02B G01B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

## C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	WO,A,88 10406 (BATELLE-INSTITUT E.V.) 29 Décembre 1988 voir le document en entier ---	1-10
Y	WO,A,92 01965 (LASERTECHNIK GMBH) 6 Février 1992 voir le document en entier ---	1-10
Y	EP,A,0 327 425 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE) 9 Août 1989 cité dans la demande voir le document en entier ---	1-10
A	WO,A,92 17806 (G. BRAKENHOFF) 15 Octobre 1992 voir page 8, ligne 4 - ligne 28 voir page 9, ligne 11 - ligne 36; figures 4,5 ---	4
-/-		

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

## \* Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

\*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

\*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

\*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

\*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

4 Octobre 1994

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

19. 10. 94

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale  
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+ 31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Scheu, M



Dernz Internationale No  
PCT/FR 94/00747

**1**

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demr. Internationale No

PCT/FR 94/00747

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO-A-8810406	29-12-88	CH-A- 671828	29-09-89
		DE-A- 3869579	30-04-92
		EP-A, B 0321529	28-06-89
		US-A- 5165063	17-11-92
WO-A-9201965	06-02-92	DE-A- 4023292	23-01-92
		EP-A- 0466979	22-01-92
		JP-T- 5502953	20-05-93
EP-A-0327425	09-08-89	FR-A- 2626383	28-07-89
		DE-T- 68906040	14-10-93
		JP-A- 1245215	29-09-89
		US-A- 4965441	23-10-90
WO-A-9217806	15-10-92	AUCUN	
EP-A-0485803	20-05-92	DE-A- 4035799	14-05-92
		CA-A- 2054928	11-05-92
		JP-A- 4265918	22-09-92
		US-A- 5239178	24-08-93

PTO 03-2197

CY=WO DATE=19950105 KIND=A1  
PN=95/00871

THREE-DIMENSIONAL IMAGING DEVICE  
[Dispositif d'acquisition d'images tridimensionnelles]

Bernard Picard

---

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE  
Washington, D. C. March 2003

Translated by: FLS, Inc.

PUBLICATION COUNTRY	(10): WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO)
DOCUMENT NUMBER	(11): WO 95/00871
DOCUMENT KIND	(12): A1
PUBLICATION DATE	(43): 19950105
APPLICATION NUMBER	(21): PCT/FR94/00747
APPLICATION DATE	(22): 19940621
INTERNATIONAL CLASSIFICATION	(51): G02B 21/00, G01B 11/24, 9/04
PRIORITY COUNTRY	(33): FR
PRIORITY NUMBER	(31): 93/07534.0
PRIORITY DATE	(32): 19930622
DESIGNATED CONTRACTING	(81): US (AT BE CH DE DK ES FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE)
INVENTOR	(72): PICARD, BERNARD
APPLICANT	(71): COMMISARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE
TITLE	(54): THREE-DIMENSIONAL IMAGING DEVICE
FOREIGN TITLE	(54A): DISPOSITIF D'ACQUISITION D'IMAGES TRIDIMENSIONNELLES

---

## SPECIFICATION

The present invention concerns a device for the acquisition of three-dimensional images.

In the preferred acquisition modes, the present invention permits an acquisition of images at a rate in the order of 10 images per second or more and, in particular, an acquisition of images in "real time", that is to say, at the video rate (25 images per second).

The field of three-dimensional imaging (that is to say, of the acquisition of three-dimensional images) is in vigorous growth and touching ever wider sectors, both in industry as well as in the biomedical field.

The principal domains concerned with three-dimensional imagery are:

- dimensional control,
- quality control,
- the guiding of robots,
- biomedical imaging.

The techniques utilized in three-dimensional imaging are very numerous.

There will be a report on this matter in document (1), which, like the other documents cited below, is mentioned at the end of the present specification.

Among these techniques it is possible in particular to cite:

- triangulation by laser (utilizing a luminous spot or line generated by the laser),
- confocal imaging,
- tunneling microscopy,
- interferometry,
- ~~mottled fringes,~~
- the technique of phase shifting,
- photogrammetry,
- measurement by radar,
- the measurement of flight time,
- volume densitometry,
- mechanical profilometry.

/2

One of the principal limitations of systems for the acquisition of three-dimensional images is that these systems often work with

---

\* Numbers in the margin indicate pagination in the foreign text.

acquisition rates that are far below the video rate (25 images per second).

Those systems that do operate at the video rate are often complex and costly (see documents (2) and (3)).

As it will later become apparent, in a preferred embodiment, the three-dimensional imaging device that forms the object of the present invention is capable of operating at the video rate, while being much simpler than the known devices capable of working at such a rate.

The present device utilizes the technique of confocal imaging.

This technique has been the object of numerous articles in the field of microscopy (see document (4)), where it is utilized nearly exclusively.

The diagram in Fig. 1 illustrates the principle of confocal imaging.

According to this principle, an object to be observed is illuminated by means of a point light source, and the light reflected by this object is detected by means of a point detector.

More precisely, that light emitted by a source S is focused by means of a lens 1, onto a diaphragm 2, to obtain a point source A<sub>0</sub>. /3

The source S can be a classic arc or filament source, or a laser.

A focusing lens 3 makes it possible to focus the light transmitted by the diaphragm or filter 2 onto a spot situated at point A<sub>10</sub>.

A semitransparent mirror 4 permits reflection of the light collected by the lens 3 onto a photodetector 5.

A diaphragm 6, positioned at point A<sub>20</sub>, conjugated from point A<sub>10</sub> by lens 3, permits filtration of that light reflected by the semitransparent mirror 4, the photodetector 5 receiving only that luminous energy transmitted by the opening in the diaphragm 6.

A two-dimensional image is obtained by scanning the luminous spot on the object to be observed.

A confocal imaging device is therefore a particular embodiment of optical imaging devices employing scanning.

When the point of the object to be observed is situated in the focal plane P of lens 3, that is to say, at A<sub>10</sub>, the image of the

latter formed by this lens 3 is the point A2o positioned in the center of the opening of the diaphragm 6.

In this configuration, the width of the luminous spot at the level of the diaphragm or filter 6 is minimal, and the quantity of light received by the photodetector is maximal.

When the point of the object to be observed is at a distance from the focal plane of the lens 3 and located, for example, at A1, the image of the same by the lens 3 will then be at point A2, and the width of the luminous spot at the level of the filter 6 increases, whereas the quantity of light received by the photodetector 5 diminishes. /4

This property, which confocal imaging systems have, of producing images whose luminous intensity is a decreasing function of the distance from the object to the focal point of the focusing lens is designated by the term "axial selectivity".

In the case of slight defects in focusing, the axial transmission  $T(z)$  of the confocal filter, which is the ratio of the luminous intensity transmitted by the filter 6 to the incident luminous intensity on this filter is given by the following formula (1):

$$T(z) = \sin^2 (u/2) / (u/2)^2$$

with:

$$u = (2\pi/\lambda) \cdot z \cdot \sin^2 \alpha,$$

where  $\lambda$  represents the length of a wavelength of the observation light;

$z$  is the distance from the object to the focal plane, counted parallel to the  $z$  axis of the lens 3;

$\sin \alpha$  is the numerical aperture of the focusing lens.

In confocal imaging, the two-dimensional image of the object to be observed is obtained by scanning the luminous spot.

This scanning is obtained by displacement of the object or of the luminous spot or by displacement of the object in one direction and displacement of the luminous spot in a direction perpendicular to the preceding.

The great majority of confocal imaging systems and of optical scanning systems utilizes the light from a laser beam due to the extremely high focusing power of the same, a power that makes it possible to obtain extremely high luminous intensities in spots of very small dimensions. /5

These systems operate at acquisition rates lower than the video rate, due to scanning which is in general mechanical and operates at very low frequencies.

Nevertheless, certain systems do operate at the video rate, thanks to the utilization of a polygonal mirror that revolves at very high speed (see document (2)).

These systems are however complex and expensive.

Other systems operating at the video rate utilize a device for the acousto-optical deflection of the laser beam (see document (5)).

A technique for scanning by Nipkow disk likewise permits working at the video rate (see documents (4), (6) and (7)).

This scanning technique presents the advantage of being utilizable with classic luminous sources of the arc-lamp type and of being easy to implement.

An confocal imaging device utilizing a Nipkow disk is shown schematically in Fig. 2.

A Nipkow disk is a metal disk, for example, a chromium mask that is pierced by dozens of holes with a diameter of several millimeters and arranged spirally (see document (7)).

That device represented schematically in Fig. 2 comprises an arc lamp **7**, which illuminates the Nipkow disk **8** via a focusing lens **9**.

A focusing lens **10**, whose axis is labeled Z, projects the image of this disk **8** onto an object to be observed **O**.

The light reflected by this object **O** passes through the disk **8** on its way back.

A beam splitter **11** permits the light transmitted by the disk to be reflected towards a focusing lens **12**, and this lens forms the image of the disk on the photosensitive surface of a video camera **13** of the CCD type.

When the disk **8** is animated by a rotating movement thanks to appropriate means **14**, it behaves like a group of point light sources and confocal filters, according to the principle diagram in Fig. 1, which synchronously scan the object to be observed **O**.

The rotation of the disk makes it possible to generate a two-dimensional image at the level of the camera **13**.



The spiral arrangement of the holes in the disk **8** produces an apparent radial displacement of these holes, which avoids the formation of lines on the image obtained.

In confocal imaging, the intensity of the image is maximal when the points of the object to be observed are situated in the focal plane **P** of the focusing lens **10**.

This property can be employed to obtain three-dimensional images (see document (4)).

To do this with the aid of a confocal imaging device, a series of image acquisitions **N** (optical sections)  $I_n(x,y)$  is produced, with different altitudes  $z_n$  (the object being displaced vertically for this purpose), where  $z_n$  is equal to the altitude  $z_0$  of the focal plane **P**, augmented by a quantity  $n \cdot \Delta z$  ( $n$  varying between 1 and **N**). /7

The search for the peak intensity in the series of luminous intensities at each coordinate point  $(x,y)$  in a plane perpendicular to the **Z** axis permits determination of the point's position along axis **Z**.

This axial position corresponds at each point to that position **z** where the luminous intensity obtained is maximal.

In other terms, for each point  $(x,y)$ , **N** images are arranged along the **Z** axis, and the position **z** corresponding to the intersection of the object and an axis parallel to the **Z** axis corresponds to the maximal luminous intensity.

If a confocal imaging device operating at the video rate is utilized to effect the acquisitions, the rate of three-dimensional image acquisition is divided by the number **N**, which represents the number of images necessary to cover the topography of the object to be observed.

The present invention makes it possible to obtain the three-dimensional image of the object in a single acquisition.

If it is considered that the number of acquisitions **N** currently achievable is about a hundred, and even a thousand in certain applications, one gets an idea of the interest that the present invention can represent.

Known from document (8), which will be discussed below, is an optical, confocal microscope with scanning and an extended depth of field.

This known device utilizes:

- a polychromatic luminous source, that is to say, one having at least two different wavelengths;
- a confocal imaging system;
- a lens exhibiting longitudinal chromatism or axial chromatism; and
- a spectral analysis of the light.

These four elements permit obtainment of a three-dimensional image of the object observed, in a single acquisition.

The longitudinal dynamic of the known device is equal to the number of secondary light beams.

This known device permits the longitudinal measurement, parallel to the lens axis, of only a limited number of points, corresponding to the number of secondary light beams.

So that the embodiment of this known device will not become too complex, an argon laser is utilized as the polychromatic luminous light source, whose light contains at least seven wavelengths that are sufficiently intense in the visible spectrum.

Such a device permits the acquisition of images in only seven planes.

This device is adequate for utilization in microscopy, for the observation of microelectronic objects such as integrated circuits, but is not utilizable for applications necessitating a significant longitudinal dynamic.

The purpose of the present invention is to remedy this inconvenience by proposing a device having a large longitudinal dynamic.

In precise fashion, the present invention has for its object a device for the acquisition of three-dimensional images of an object, this device comprising:

- 
- a light source with an extended luminous spectrum,
  - means for the formation of point light sources, starting from the light emitted from the source with an extended luminous spectrum,
  - means for focusing light from each point source onto the object, these focusing means having an axial chromatism, the latter varying in a monotonous manner (preferably a linear manner) as a function of the wavelength of that light emitted from the source,
  - means for separation of the beam, provided to reflect that light reflected by each point of the object,
  - filtering means comprising at least two chromatic filters with spectral responses that differ from one another and vary in monotonous fashion (preferably in linear fashion) as a function

of the wavelength of the light emitted from the source, and which are provided to receive that light reflected by the means of beam separation,

- means of photodetection comprising at least two photodetectors respectively associated with filters and provided to receive the light respectively filtered by the same, these two photodetectors simultaneously receiving luminous information relative to the same point on the object, and
- electronic means for processing those signals provided by the photodetectors,

this device being characterized by the fact that these electronic processing means are provided to form the ratio of one of these signals to the other and in order to determine the position of each point on the object parallel to the axis of the focusing means with the aid of this ratio and information are stored in the memory of these electronic processing means, which produce a preliminary calibration of the device.

/10

That device forming the object of the present invention presents a much greater longitudinal dynamic, much greater simplicity and therefore a cost lower than that of the known device disclosed in document (8), which requires as many detection or modulation devices as there are secondary light beams (although two photodetectors suffice in the present invention).

According to one particular embodiment mode of the device forming the object of the invention, the means of photodetection comprise two video cameras of the CCD or tube type, arranged in such a way that the photosensitive pixels of one of these cameras are respectively associated with the photosensitive pixels of the other cameras and that each point on the object is observed by two associated pixels.

According to another particular embodiment, the device forming the object of the invention comprises a color video camera that constitutes at the same time means of filtering and means of photodetection.

~~In a first particular embodiment of the invention, the means for the formation of point light sources comprise:~~

- ~~- a Nipkow disk, and~~
- ~~- means for the rotation of this disk on its axis.~~

In that case in which the two above-mentioned video cameras are used, the means for the formation of point light sources can comprise a fixed mask equipped with openings, each of these openings corresponding to one photosensitive pixel of each of these two cameras.

/11

In that case where the color video camera mentioned further above is utilized, the means for the formation of point light sources can

comprise a fixed mask equipped with openings, each of these openings corresponding to one photosensitive pixel of the color video camera.

In another particular embodiment of the invention, the means for the formation of point light sources comprise:

- a mask with an opening, forming a confocal filter, and
- means for the relative displacement of the object relative to the beam of light emitted by the light source having an extended luminous spectrum.

The device constituting the object of the invention can also comprise a bundle of ordered optical fibers, which is placed between the means for the formation of point light sources and the means of focusing.

The present invention will be better understood on reading the description of example embodiments presented below, indicatively and by no means limitatively, by making reference to the attached drawings in which:

- Figure 1, already described, schematically illustrates the principle of confocal imaging;
- Figure 2, already described, is a schematic view of a known confocal imaging device utilizing a Nipkow disk;
- Figure 3 is a schematic view of a particular embodiment mode of the device that forms the object of the invention;
- Figure 4 is a schematic view of a focusing lens that presents and axial chromatism, utilized in the device according to Fig. 3; /12
- Figure 5 is a schematic view of part of another device according to the invention, which utilizes a color video camera;
- Figure 6 is a schematic view of part of another device according to the invention, utilizing an aperture playing the role of a confocal filter, two point detectors and means for scanning the object under study;
- Figure 7 is a schematic view of a mask utilizable in the present invention; and
- Figure 8 is a partial schematic view of another device according to the invention, which utilizes an ordered bundle of optical fibers.

The device according to the invention, which is represented schematically in Fig. 3, permits an acquisition of images at the video rate and includes, as the device represented in Fig. 2:

- the luminous broad-spectrum light source **7**, for example, a xenon arc lamp;
- the Nipkow disk **8**, equipped with means of rotation **14**;
- the lens **9** for focusing the light emitted by the source **7** onto the disk **8**;
- the beam splitter **11**; and
- the focusing lens **12**.

The device in Fig. 3 also includes a focusing lens **15** that presents axial chromatism, in place of the focusing lens **10**, the axis of lens **15** carrying the reference **Z**, the axis of rotation of the disk **8** being parallel to this axis **Z** in the example in Fig. 3.

The width of the spectrum of the source **7** is adapted to the desired longitudinal dynamic (the more a significant dynamic is desired, the greater the need to choose a broad spectrum).

/13

As above, the beam splitter **11** is positioned between the lens **9** and the disk **8**, and this beam splitter **11** is traversed by the light emitted from the source **7** and focused by the lens **9** and reflects the light from the lens with axial chromatism **15** in the direction of lens **12**, which focuses this reflected light.

The effect of axial chromatism, or longitudinal chromatism, of the focusing lens **15** is illustrated schematically in Fig. 4.

The focal distance of this lens **15** depends upon the wavelength of the light.

Such a lens presents as many different focal planes as there are wavelengths present in the incident luminous beam.

Thus, a luminous source placed at a point **A** has as many images produced by this lens as there are wavelengths present in the luminous beam.

These images are aligned along a luminous segment **A1b**, **A1r**, where **A1b** and **A1r** are respectively the blue and red images of point **A**.

Likewise represented in an intermediate image **A1 $\lambda$** , positioned between **A1b** and **A1r**, where  $\lambda$  is a wavelength included between that wavelength corresponding to blue and that wavelength corresponding to red.

~~Also seen in Fig. 4 is another point **B**, whose images **B1b**, **B1 $\lambda$**  and **B1r** correspond respectively to the images **A1b**, **A1 $\lambda$**  and **A1r** of point **A**.~~

The effect of the longitudinal chromatism of a lens, in confocal imaging, is described in documents (5) and (7).

/14

It was seen above that, in confocal imaging, the transmission of the confocal filter is a decreasing function of the distance, the points from the object to the focusing plane of the lens being counted along the axis **Z** of the lens according to formula (1).

Thus, if the focusing lens presents a longitudinal chromatism at a given point on the object, the Nipkow disk will transmit each

wavelength differently according to the distance, counted along the axis Z of the lens, separating this point from the corresponding focal plane.

That wavelength whose focal plane corresponds with the point on the object is transmitted with the maximal luminous intensity, and the other wavelengths are transmitted with intensities that decrease to the extent that the distance separating the corresponding focal planes from the object increases.

In that device illustrated schematically in Fig. 3, if the spectra of the luminous source 7 and of the object are perfectly white, the image obtained from the object O (positioned in the focal zone of lens 15) will be a colored image that is perfectly focused, whose spectral composition at each point depends only upon the axial position of this point relative to the focusing lens 15.

Thus, the device in Fig. 3 comprises a "coding module" that includes a confocal device equipped with a lens having a longitudinal chromatism in order to effect the chromatic coding of the axial position of the points of the object O. /15

Reciprocally, a point-by-point chromatic analysis of the colored image makes it possible to determine the axial position of the points of the object O.

This chromatic analysis is effected in a "decoding module" that likewise includes the device from Fig. 3.

This decoding module D includes another beam splitter 16 (making it possible to obtain two identical images from that image formed by lens 12), a first video camera of the CCD or tube type, labeled C1 and associated with a first chromatic filter F1 as well as a second video camera of the CCD or tube type, labeled C2 and associated with a second chromatic filter F2.

That colored image reflected by the beam splitter 11 is then sent by beam splitter 16 to the photosensitive pixels of the cameras C1 and C2 via the filters F1 and F2.

It is specified that the cameras C1 and C2 are arranged in such a way that these two cameras will see the same points on the object O, that is to say, each pixel of one of the cameras is associated with a pixel of the other camera, two associated pixels seeing one and the same point on the object O.

The decoding module D also comprises:

- two electronic cards for the acquisition and digitization of those images respectively provided by the cameras C1 and C2 and respectively bearing the references MA1 and MA2;
- an electronic processing module MT designed to effect the division of one of the digitized images by the other, pixel by pixel, as well as the calculation of the position along the axis Z of the points of the object O, and to control the operation of the device in Fig. 3 as a whole; and
- visualization means **18**, a video screen for example, designed to display the results of the calculations.

/16

It is stated that a device for the analysis of color by means of two photodiodes having different spectral sensitivities is described in document (9).

Described now is the mathematical modeling of the operation of that device in Fig. 3.

In the following:

- $L(\lambda)$  designates the spectral composition of the luminous source

7;

-  $r(x,y,\theta,\varphi)$  designates the reflection factor from the object O at the coordinate point  $(x,y)$ , in the direction of the Z axis of the focusing lens 15, which is oriented along angles  $\theta$  and  $\varphi$  relative to the normal to the object at this point (the x and y coordinates being defined in a plane perpendicular to the Z axis);

$R(\lambda)$  designate the spectral reflectivity of the object, which is assumed to be uniform over the entire object;

-  $T(z)$  designates the axial transmission of the confocal filter as a function of z (see formula (1));

- z designates the axial position of the points from the object (counted on the Z axis);

-  $z(\lambda)$  designates the "curve" of chromatism from the focusing lens, that is to say, the position (referred to the Z axis) of the focusing plane for a given wavelength  $\lambda$  (for the position of the Nipkow disk for which the lens **15** is calculated in order to have good resolution and the desired chromatism).

-  $T1(\lambda)$  designates the spectral transmission of the filter

/17

F1;

-  $T2(\lambda)$  designates the spectral transmission of the filter F2;

- $S1(\lambda)$  designates the spectral sensitivity of camera C1;
- $S2(\lambda)$  designates the spectral sensitivity of camera C2.

For the wavelength  $\lambda$ , the axial transmission of the Nipkow disk **8** is equal to  $T(z-z(\lambda))$ .

The spectral composition of the image of the point on the object, coordinates  $(x, y, z)$ , which is received by the camera C1, is given by equation (2):

$$\phi1(x, y, z, \lambda) = L(\lambda) \cdot r(x, y, \theta, \varphi) \cdot R(\lambda) \cdot T(z-z(\lambda)) \cdot T1(\lambda).$$

The signal delivered by camera C1 is given by equation (3):

$$s1(x, y, z) = \int \phi1(x, y, z, \lambda) \cdot S1(\lambda) \cdot d\lambda$$

The result, therefore, is equation (4):

$$s1(x, y, z) = \int r(x, y, \theta, \varphi) \cdot L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z-z(\lambda)) \cdot T1(\lambda) \cdot S1(\lambda) \cdot d\lambda$$

It is specified that all these integrals and the following ones are taken on the luminous source.

If the focusing lens **15** does not present lateral chromatism, the coordinates  $x$  and  $y$  of the points on the object viewed by each camera are independent of the wavelength  $\lambda$ .

In this case, the term  $r(x, y, \theta, \varphi)$  can be obtained from the integral, and equation (4) can then be rewritten according to equation (5): /18

$$s1(x, y, z) = r(x, y, \theta, \varphi) \cdot F1(z),$$

where  $F1(z)$  designates the integral:

$$\int L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z-z(\lambda)) \cdot T1(\lambda) \cdot S1(\lambda) \cdot d\lambda.$$

This integral depends only upon the axial position  $z$  of the point with coordinates  $(x, y)$  on the object.

In the same way, the signal delivered by camera C2 is given by equation (6):

$$s2(x, y, z) = r(x, y, \theta, \varphi) \cdot F2(z),$$

where  $F2(z)$  designates the integral:



$$\int L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z-z(\lambda)) \cdot T_2(\lambda) \cdot S_2(\lambda) \cdot d\lambda.$$

Calculating the ratio  $s_1(x,y,z) / s_2(x,y,z)$  eliminates the term  $r(x,y,\theta,\varphi)$ .

Then obtained in the quantity  $s(z)$ , which will then depend only upon  $z$ , according to equation (7):

$$s(z) = F_1(z) / F_2(z).$$

In the course of an operation for calibrating the device, the variations of the equation  $\rho=s(z)$  as a function of  $z$  are determined experimentally, and these variations are stored in the memory of the electronic-processing module MT.

Thus, the calculation of the parameter  $\rho$  of the image of a point on the object, with coordinates  $(x,y)$ , permits determination of the axial position  $z$  of this point, according to equation (8): /19

$$z = s^{-1}(\rho).$$

In practice, two identical cameras are used, C1 and C2, and the sensitivities  $S_1(\lambda)$  and  $S_2(\lambda)$  are therefore theoretically identical. If the filters, F1 and F2, are not used, the result would be:

$$F_1(z) = F_2(z) = \int L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot T(z-z(\lambda)) \cdot S_1(\lambda) \cdot d\lambda.$$

Parameter  $\rho$  would be equal to 1 and would not permit measurement of the axial position of those points on the object.

The utilization of the filters, F1 and F2, whose sensitivities or spectral responses are different from one another, makes it possible to obtain a ratio  $F_1(z)/F_2(z)$ , which develops, notably, as a function of the axial position of the points on the object.

---

Consideration shall now be given to that case in which the axial chromatism of the lens **15** is great due to the axial selectivity of the confocal device.

let us consider, for example, a confocal device having the following characteristics:

- axial selectivity:  $\Delta z = 20 \mu\text{m}$ ;
- spectral width of the luminous source:  $\Delta \lambda = 0.4 - 0.8 \mu\text{m}$ ;
- chromatism of the lens = 1 mm in the  $0.4 - 0.8 \mu\text{m}$  band.

In this case, the width at the mid-level of the function  $T(z-z(\lambda))$  is equal to 20/1,000 or 1/50th of the spectral width  $\Delta\lambda$  of the luminous source **7**. /20

The magnitudes  $L(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$ ,  $T1(\lambda)$  and  $S1(\lambda)$  vary slowly as a function of  $\lambda$ , and  $T(z-z(\lambda))$  can be assimilated to a Dirac "peak",  $\delta(\lambda-\lambda_z)$ , where  $\lambda_z$  represents that wavelength corresponding to the focal plane, whose axial position is equal to  $z$ .

In this case it is possible to write:

$$F1(z) = \int L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \delta(\lambda - \lambda_z) \cdot T1(\lambda) \cdot S1(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$F1(z) = L(\lambda_z) \cdot R(\lambda_z) \cdot T1(\lambda_z) \cdot S1(\lambda_z)$$

Equation (7) then becomes equation (9):

$$s(z) = [T1(\lambda) \cdot S1(\lambda_z)] / [T2(\lambda) \cdot S2(\lambda_z)]$$

In that case where the axial chromatism of lens **15** is large relative to the axial selectivity of the confocal device, it is not necessary to suppose that the spectral reflectivity of the object is uniform.

In fact, we observe  $r(x,y,\theta,\phi,\lambda)$ , the spectral reflectivity of the object at that point with coordinates  $(x,y)$ , in the direction of the  $Z$  axis of the focusing lens, which is oriented according to the angles  $\theta$  and  $\phi$  relative to the normal to the object at that point.

To the extent that  $r(x,y,\theta,\phi,\lambda)$  varies slowly as a function of  $\lambda$ , equation (4) is transformed into equation (10) below:

$$s1(x,y,z) = \int r(x,y,\theta,\phi,\lambda) \cdot L(\lambda) \cdot \delta(\lambda - \lambda_z) \cdot T1(\lambda) \cdot S1(\lambda) \cdot d\lambda$$

~~The result is equation (11) below:~~ /21

$$s1(x,y,z) = r(x,y,\theta,\phi,\lambda_z) \cdot L(\lambda_z) \cdot T1(\lambda_z) \cdot S1(\lambda_z)$$

The  $s1(x,y,z)/s2(x,y,z)$  ratio permits elimination of the terms  $r(x,y,\theta,\phi,\lambda_z)$  and  $L(\lambda_z)$ , and this ratio is expressed anew by equation (9).

In the same way, in this case where the axial chromatism of the lens **15** is large relative to the axial selectivity of the confocal device, it is not necessary for the focusing lens **15** to be corrected for lateral chromatism.

In fact, if the lens does exhibit lateral chromatism, that signifies that the coordinates  $x$  and  $y$  of the points of the object viewed by each camera depend upon the wavelength  $\lambda$ , that is to say,  $x=x(\lambda)$  and  $y=y(\lambda)$ .

In this case, the terms  $r(x,y,\theta,\varphi)$  is written  $r[x(\lambda),y(\lambda),\theta,\varphi]$ , and the equation becomes equation (12) below:

$$s_1(x,y,z) = r[x(\lambda z),y(\lambda z),\theta,\varphi,\lambda z] \cdot L(\lambda z) \cdot T_1(\lambda z) \cdot S_1(\lambda z)$$

The term  $r[x(\lambda z),y(\lambda z),\theta,\varphi,\lambda z]$  is likewise eliminated by calculating the  $s_1(x,y,z)/s_2(x,y,z)$  ratio.

It is expedient for the longitudinal chromatism of the focusing lens **15** to be calculated in such a way that the longitudinal chromatism will vary monotonously as a function of the wavelength of the light emitted by the source, the ideal being a linear variation that yields a very simple variation between the different wavelengths and the associated focal planes.

This focusing lens **15** can possibly be corrected for lateral chromatism, according to the working conditions. /22

Furthermore, the focusing lens **15** is calculated in such a way that it corrected relative to all aberrations for the wavelength range utilized.

In addition, it is expedient for the two chromatic filters  $F_1$  and  $F_2$  to be chosen in such a way that the amplitude of the signal  $s(z)$  from formula (7) will vary with the axial position  $z$  of the points on the object  $O$ , this variation being preferably linear.

Figure 5 is a schematic view of part of a different mode of particular embodiment of that device forming the object of the invention.

Represented in the decoding module **D** in Fig. 5 are the two cameras  $C_1$  and  $C_2$ , the two chromatic filters  $F_1$  and  $F_2$  in Fig. 3 being replaced by a color video camera  $C_3$ .

This camera  $C_3$  is arranged in such a way that each photosensitive pixel of the latter is associated with a point on the object  $O$  to be examined.

Such a color video camera comprises chromatic filters and delivers video signals that are generally termed green, red and blue.

It will then suffice to select two of these signals, for example, the red and green signals, and to send them respectively to the modules  $MA_1$  and  $MA_2$  to be processed as above, which further permits

calculation of the axial position  $z$  by calculating the ratio of the digital images corresponding to these red and green signals, pixel by pixel.

In a different device according to the invention, which is illustrated schematically and partially in Figure 6, the Nipkow disk **8** in Fig. 3 is replaced by a fixed mask **20** with a single aperture, playing the role of the confocal filter.

/23

The two cameras C1 and C2 are moreover replaced, respectively, by two point photodetectors P1 and P2, which, for example, are photodiodes or photomultipliers.

These photodetectors, P1 and P2, are respectively associated with the filters F1 and F2, and the signals delivered by these photodetectors P1 and P2 are respectively processed by the modules MA1 and MA2 and by the means MT and 18 mentioned above.

Furthermore, in the case of that device in Fig. 6, the scanning of the object to be examined is effected by displacement of this object, this scanning being carried out thanks to a rotating mirror **22** that can be arranged downstream of the mask **20**.

In another particular embodiment mode of the invented device, the Nipkow disk **8** in Fig. 3 is replaced by a fixed mask **24** (Fig. 7), which is perpendicular to the Z axis of the focusing lens **15** and equipped with apertures **26**.

This mask (which is located at the same position as the Nipkow disk formerly utilized) is, for example, a glass plate covered with a thin layer of chromium with openings **26**.

These openings **26** are produced in such a way that each of them corresponds to a single photosensitive pixel of each of the cameras, according to the plan in Fig. 7.

So that the mask **24** can have the play the role of a confocal filter, it is expedient for the diffraction spot of the lens **15** to be much smaller than the distance separating two adjacent pixels and equal, for example, to one tenth of this distance.

/24

Thus, if the distance separating two adjacent pixels of each camera, referred to the object, is 20  $\mu\text{m}$ , the resolution of the focusing lens must be 2  $\mu\text{m}$ .

The device in Fig. 7 presents the advantage of replacing the rotating Nipkow disk by a mask that is fixed.

Nevertheless, the openings aligned precisely relative to the pixels of the two cameras C1 and C2.

The device according to the invention, which is shown schematically and partially in Fig. 8, differs from that seen in Fig. 3 by the fact that it includes, in addition, a bundle of ordered optical fibers, which can be, possible, a flexible endoscope between the focusing lens 15 and the Nipkow disk 8, as shown in Fig. 8.

In addition, an optical element 32, whose X axis is parallel to the axis of the Nipkow disk 8, is provided between this disk and the optical-fiber bundle 30 for injecting the luminous beam issuing from the aperture in the disk into the bundle of optical fibers 30.

The other end of the bundle is positioned in the Z axis of the optical element (15, which is no longer parallel to the axis of the disk in the case of Fig. 8).

An ordered bundle of optical fibers has the property of transporting optical images in the same way as a lens, the resolution being given by the diameter of the elementary fibers forming this bundle.

So that the bundle of optical fibers will not alter the confocal-imaging property of the device according to the invention, it is necessary for the diameter of the optical fibers in this bundle to be smaller than the diffraction spot of the focusing lens 15. /25

This diameter of the optical fibers of the bundle 30 is calculated as a function of the resolution of this lens.

The diameter of the bundle of optical fibers 30 is calculated as a function of the dimensions of the image produced by this lens, the diameter of this bundle being chosen to be larger than the diameter of the image.

Those documents cited in the present specification are the following:

- (1) Besl, Paul J. 1988. Active, optical-range imaging sensors. *Machine Vision and Applications*. 127-152.
- (2) Beraldin, J. Angelo, Marc Roux, François Blais, Luc Cournoyer, Jacques Domey. 1992 (January). Registered intensity and range imaging at 10 megasamples per second. *Optical Engineering* 31(1).
- (3) Kobayashi, K., K. Akiyama, T. Suzuki, T. Yoshizawa. 1989 (December 15). Laser-scanning imaging system for real-time

measurements of 3D-object profiles. *Optics Communications* **74**(3,4):165.

- (4) Wilson, Tony, Colin Sheppard. *Theory and Practice of Optical Microscopy*. Academic Press.
- (5) Houpt, P. M. 1988. A standard video-rate confocal laser-scanning and fluorescence microscope. *Scanning* **10**:139-145.
- (6) Boyde, A. Confocal Optical Microscopy. *Microscopy and Analysis*. /26
- (7) Kino, G. S., T. R. Corle, G. Q. Xiao. 1988. New types of scanning optical microscopes. *Integrated Circuit Metrology, Inspection and Process Control II. SPIE* **921**.
- (8) FR-A 2,626,383 (see also EP-A 0,327,425 and US 4,965,441).
- (9) New industrial sensors. *Tech Tendances - Innovation* **128**.

#### CLAIMS

/27

1. Device for the acquisition of three-dimensional images of an object, comprising:

- a light source (7) with an extended luminous spectrum,
  - means (8, 14,; 20, 22, 24) for the formation of point light sources, starting from the light emitted from the source with an extended luminous spectrum,
  - means (15) for focusing light from each point source onto the object, these focusing means having an axial chromatism, the latter varying in a monotonous manner (preferably a linear manner) as a function of the wavelength of that light emitted from the source,
- 
- means (11) for separation of the beam, provided to reflect that light reflected by each point of the object,
  - filtering means comprising at least two chromatic filters (F1, F2) with spectral responses that differ from one another and vary in monotonous fashion (preferably in linear fashion) as a function of the wavelength of the light emitted from the source, and which are provided to receive that light reflected by the means (11) of beam separation,
  - means of photodetection comprising at least two photodetectors C1, C2; P1, P2) respectively associated with filters (F1, F2) and provided to receive the light respectively filtered by the same,

- these two photodetectors simultaneously receiving luminous information relative to the same point on the object, and
- electronic means (MT) for processing those signals provided by the photodetectors,

this device being characterized by the fact that these electronic processing means are provided to form the ratio of one of these signals to the other and in order to determine the position of each point on the object parallel to the axis of the focusing means with the aid of this ratio and information are stored in the memory of these electronic processing means, which produce a preliminary calibration of the device.

/28

2. Device according to Claim 1, characterized by the fact that the chromatic axis of the focusing means (15) varies in linear fashion as a function of the wavelength of the source.

3. Device according to any of the Claims 1 and 2, characterized by the fact that the spectral response of each chromatic filter (F1, F2) varies in linear fashion as a function of the wavelength of the source.

4. Device according to any of the Claims 1 to 3, characterized by the fact that the means of photodetection comprise two video cameras (C1, C2) of the CCD or tube type, so arranged that the photosensitive pixels of one of the cameras are respectively associated with the photosensitive pixels of the other camera, and that each point on the object is observed by two associated pixels.

5. Device according to any of the Claims 1 to 3, characterized by the fact that it comprises a color video camera that simultaneously constitutes the means of filtering and the means of photodetection.

6. Device according to any of the Claims 1 to 5, characterized by the fact that the means for the formation of luminous point light sources comprise:

- 
- a Nipkow disk (8), and
  - means (14) for the rotation of this disk on its axis.

/29

7. Device according to Claim 4, characterized by the fact that the means for the formation of point light sources comprise a fixed mask (24) equipped with apertures (26), each of these apertures corresponding to one photosensitive pixel (28) from each of the two cameras (C1, C2).

8. Device according to Claim 5, characterized by the fact that the means for the formation of point light sources comprise a fixed mask equipped with apertures (26), each of these apertures corresponding to a photosensitive pixel of the color video camera.

9. Device according to any one of the Claims 1 to 5, characterized by the fact that the means for the formation of point light sources comprise:

- a mask (20) with a single aperture, forming a confocal filter, and
- means (22) for the relative displacement of the object (0) with regard to the luminous beam emitted from the light source (7) with an extended luminous spectrum.

10. Device according to any one of the Claims 1 to 9, characterized by the fact that it comprises, in addition, an ordered bundle of optical fibers (30), which is positioned between the means for the formation of point light sources and the means of focusing (15).



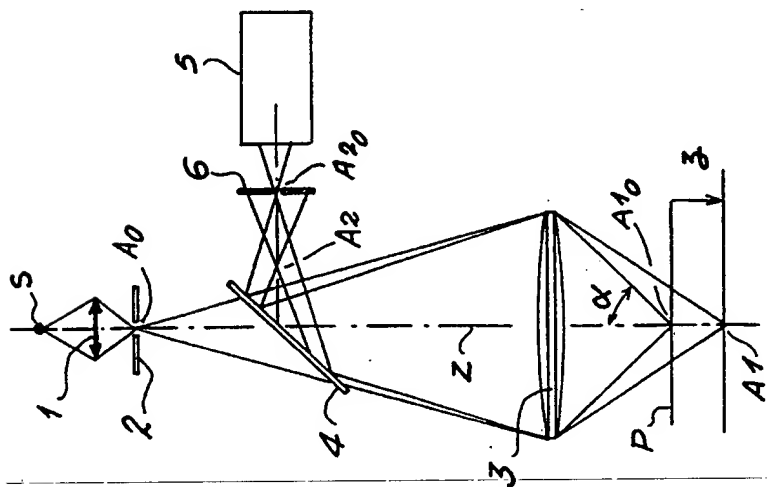


FIG. 1

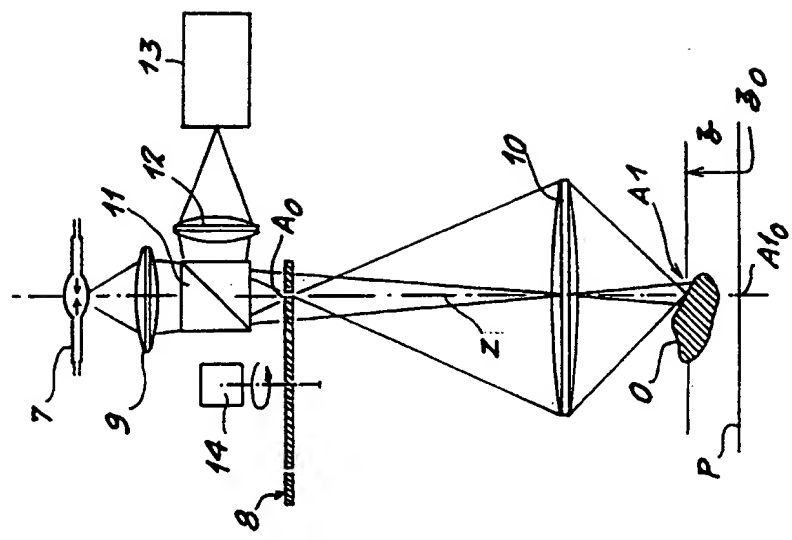


FIG. 2

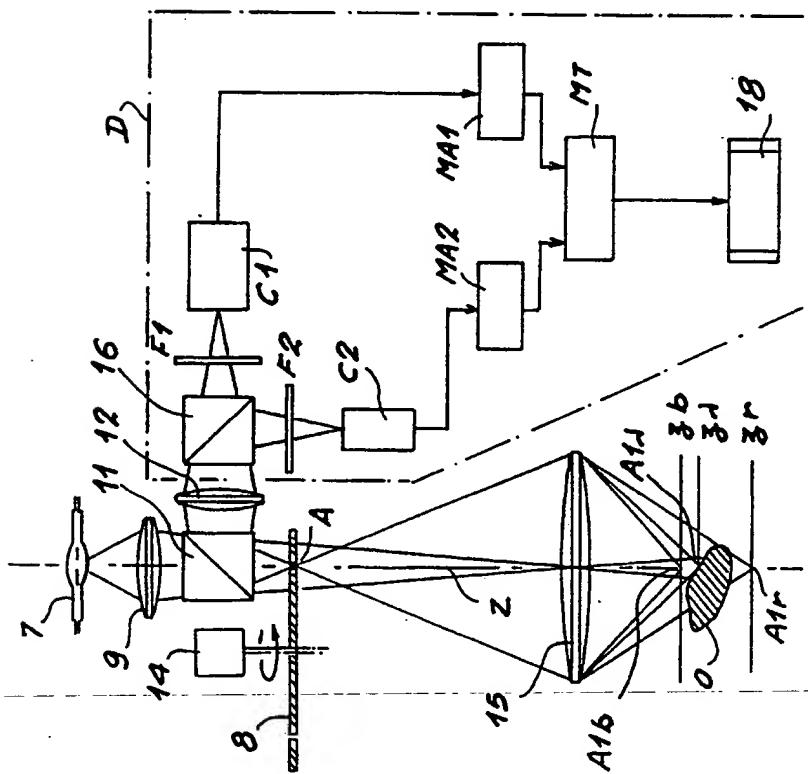


FIG. 3

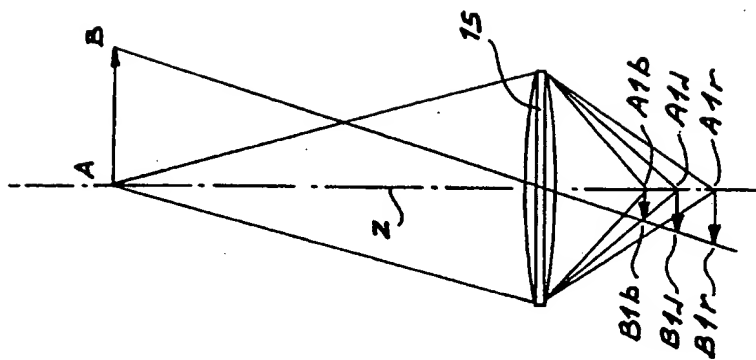


FIG. 4

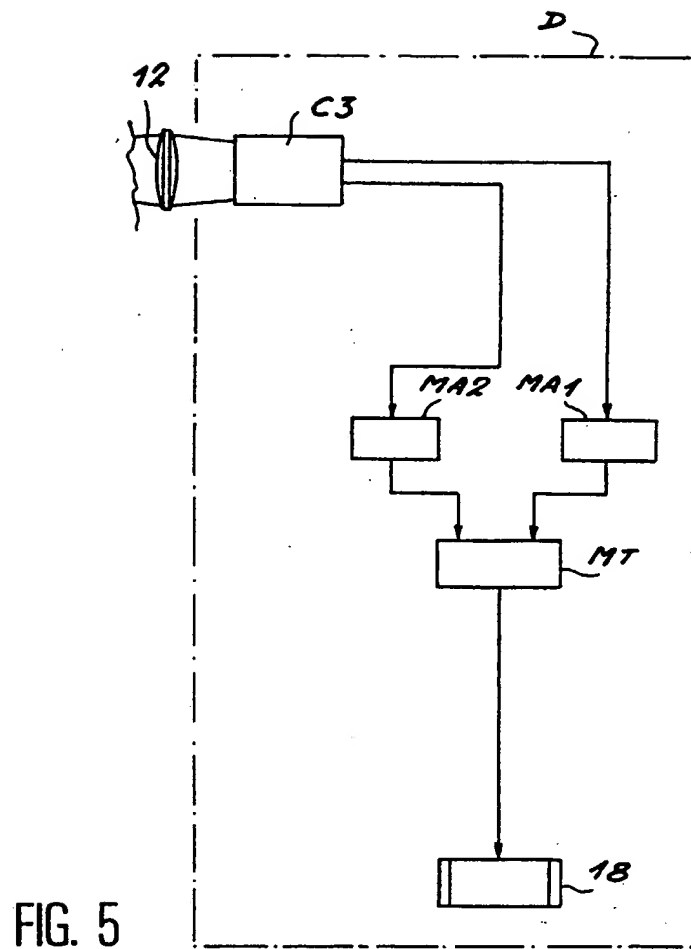


FIG. 5

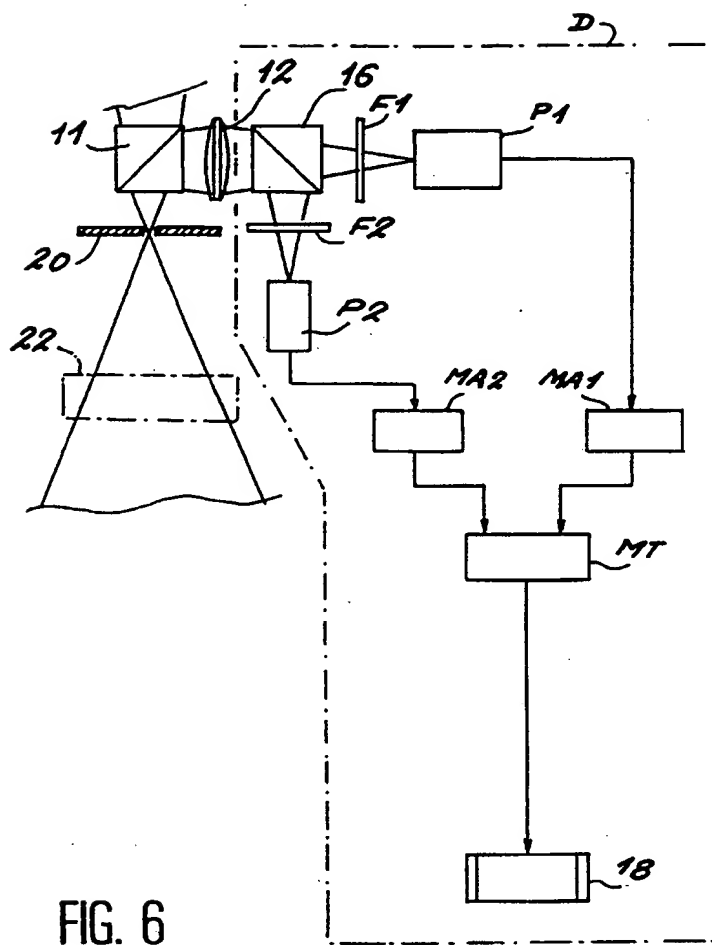


FIG. 6

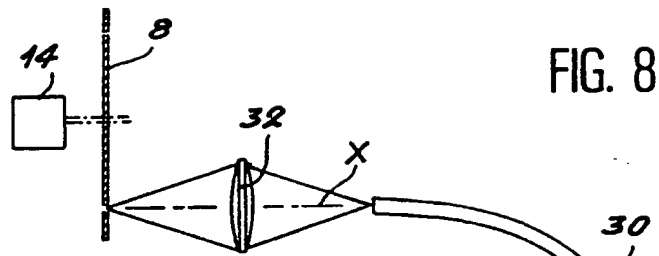


FIG. 8

FIG. 7

